

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM
ENGENHARIA MECÂNICA**

Jorge Alejandro Cristancho Caviativa

**AVALIAÇÃO DOS ENSAIOS DE DESCARGAS PARCIAIS E DE
ROTOR BLOQUEADO COMO FORMAS DE DETECÇÃO DE
DEFEITOS DE FABRICAÇÃO EM ESTADORES DE MOTORES
DE INDUÇÃO MONOFÁSICOS**

Florianópolis

2013

Jorge Alejandro Cristancho Caviativa

**AVALIAÇÃO DOS ENSAIOS DE DESCARGAS PARCIAIS E DE
ROTOR BLOQUEADO COMO FORMAS DE DETECÇÃO DE
DEFEITOS DE FABRICAÇÃO EM ESTADORES DE MOTORES
DE INDUÇÃO MONOFÁSICOS**

Dissertação submetida ao
Programa de Pós-Graduação em
Engenharia Mecânica da
Universidade Federal de Santa
Catarina para a obtenção do Grau
de Mestre em Engenharia
Mecânica
Orientador: Prof. Carlos Alberto
Flesch, Dr. Eng.

Florianópolis, SC
2013

**Ficha de identificação de obra elaborada na fonte, conforme
orientações da biblioteca da Universidade Federal de Santa Catarina**

Cristancho Caviativa, Jorge Alejandro

Avaliação dos ensaios de descargas parciais e de rotor bloqueado como formas de detecção de defeitos de fabricação em estatores de motores de indução monofásicos / Jorge Alejandro Cristancho; orientador, Carlos Alberto Flesch - Florianópolis, SC, 2013. 188p.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica.

Inclui referências

1. Engenharia Mecânica. 2. Motores de indução monofásicos. 3. Controle de qualidade de estatores. 4. Ensaio de descargas parciais. 5. Ensaio de rotor bloqueado. I. Flesch, Carlos Alberto. II. Universidade Federal de Santa Catarina. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica. III. Título.

Jorge Alejandro Cristancho Caviativa

**AVALIAÇÃO DOS ENSAIOS DE DESCARGAS PARCIAIS E DE
ROTOR BLOQUEADO COMO FORMAS DE DETECÇÃO DE
DEFEITOS DE FABRICAÇÃO EM ESTADORES DE MOTORES
DE INDUÇÃO MONOFÁSICOS**

Esta Dissertação foi julgada adequada para obtenção do Título de “Mestre em Engenharia Mecânica”, e aprovada em sua forma final pelo Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica.

Florianópolis, 28 de novembro de 2013

Prof. Armando Albertazzi Gonçalves Jr., Dr. Eng.
Coordenador do Curso

Banca Examinadora:

Prof. Carlos Alberto Flesch, Dr. Eng. (Presidente)
Orientador

Prof. Hari Bruno Mohr, Dr. Eng. (PGEEL-UFSC)

Prof. Tiago Loureiro Figaro da Costa Pinto, Dr. Eng. (POSMEC-UFSC)

Prof. Marco Aurélio de Oliveira, Dr. Eng. (UNISOCIESC)

Ofereço este trabalho a Deus que tem me
dado tudo: a vida, minha esposa Margareth
Andrea, meus pais, minha família, e a
possibilidade de aprender.

AGRADECIMENTOS

Ao professor Carlos Alberto Flesch pela oportunidade de trabalhar no seu laboratório, orientação e confiança.

Ao Antonio Luiz Schalata Pacheco pela inestimável ajuda, o grande esforço, dedicação e o tempo despendido na revisão do trabalho. Os muito interessantes comentários e sugestões com certeza já são memoráveis.

Ao Cesar Penz pela colaboração, pertinentes sugestões, contínua disposição e comprometimento com os trabalhos desenvolvidos no laboratório.

Aos colegas, parceiros e equipe do Labmetro/Liae.

À UFSC, PosMec, Labmetro, CERTI, FEESC e demais instituições que deram algum tipo de suporte ao desenvolvimento deste trabalho.

À Embraco pela pareceria e aos seus engenheiros e demais profissionais que contribuíram neste trabalho.

Ao povo de Florianópolis, de Santa Catarina e do Brasil pela acolhida.

À minha amada esposa Margareth Andrea que é muitíssimo mais do que uma ajuda adequada, muitíssimo mais do que a minha mulher.

À minha família toda: pais, irmãos, sobrinhos, sogros e cunhados pelas contínuas orações, o ânimo e por ter suportado confiadamente nossa ausência.

Principalmente a Deus, quem dispôs todas as pessoas, situações, instituições e coisas para a realização deste trabalho.

When the solution is simple, God is answering.

Albert Einstein (1879-1955)

*When the solution is complex maybe we are
misinterpreting.*

Anónimo

RESUMO

Como parte da garantia da qualidade na produção de estatores de motores de indução monofásicos, são empregados vários ensaios elétricos de rotina, visando assegurar a conformidade do produto. Tipicamente, tais ensaios são: resistência elétrica, tensão aplicada, surto elétrico e sentido de rotação. Em linhas de elevado fluxo de produção de estatores, esses ensaios nem sempre conseguem a efetividade desejada, permitindo que peças não conformes cheguem ao cliente. Visando aprimorar a detecção de defeitos de fabricação de estatores, este trabalho realiza uma pesquisa da aplicabilidade de dois ensaios não usuais para esse propósito: descargas parciais em baixa tensão e rotor bloqueado, como complemento aos testes usuais. Para o ensaio de descargas parciais, a partir da literatura e normas disponíveis, fez-se um estudo teórico das condições que influenciam a atividade e detecção desse fenômeno. Para o ensaio de rotor bloqueado, empregando uma bancada protótipo desenvolvida no âmbito desta dissertação, fez-se um estudo experimental dos sinais de corrente e de torque para um modelo de estator monofásico. Apresentam-se as limitações encontradas para cada método e sua potencial utilidade como ferramenta para detecção de defeitos. No caso do ensaio de descargas parciais ficou caracterizado que os níveis máximos de tensão passíveis de aplicação nos estatores em questão não são suficientes para gerar descargas parciais que evidenciem, de forma eficiente, defeitos de fabricação. Para o caso do ensaio de rotor bloqueado, a análise da corrente se mostrou bem mais efetiva do que a do torque, chegando-se a resultados que indicam potencial da técnica como método complementar aos atualmente empregados para identificação de defeitos em estatores.

Palavras-chave: Ensaios em motores. Motores de indução monofásicos. Controle de qualidade de estatores. Ensaio de descargas parciais. Ensaio de rotor bloqueado.

ABSTRACT

Several routinely electric tests are used in production of single-phase induction motor stators, as part of quality assurance programs, in order to ensure product conformity. Typically, the applied tests are: winding resistance, hipot (applied voltage), electrical surge and rotational direction. In high flow production lines of stators, these tests do not always get the desired effectiveness in all pieces produced, some of them erroneously outcomes to client as a product accepted, despite actually defective. In order to improve defects detection in stators manufacturing, it was researched the applicability of two not usual tests: low-voltage partial discharge and locked rotor, as complement to routine tests. To attend the partial discharges study, was taking the literature and standards available and done a theoretical survey of conditions that may influence the activity and detection of this phenomenon. By means of a prototype test bench system, conceived, designed and developed to perform the locked rotor test, was done an experimental study with current and torque measurements for a model of single-phase stator. From the carried research out for both test methods, are presented the founded limitations and potential useful of each, as a tool for defect detection. For partial discharges was characterized that maximum voltage level applicable for the stator under test are insufficient for detection of fabrication defects. For rotor locked test, the analysis of current showed more effectiveness than torque, leading to results that indicate the potential of the technique as a complementary method to the currently used for identification of defects in stators.

Keywords: Motor tests. Single-phase induction motor. Quality control of stators. Partial discharges test. Locked rotor test.

LISTA DE FIGURAS

| | |
|---|----|
| Figura 1 – Motor de indução de Tesla de 1888 e motor de indução trifásico gaiola de esquilo de Dolivo-Dobrowolsky de 1889. | 30 |
| Figura 2 – Partes básicas de um sistema de refrigeração doméstico e circuito de refrigeração..... | 34 |
| Figura 3 – Componentes de um compressor alternativo hermético. | 35 |
| Figura 4 – Classificação de motores elétricos destacando a família dos MIM e os usados em compressores herméticos de refrigeração. | 37 |
| Figura 5 – Partes do motor de indução monofásico (MIM). | 38 |
| Figura 6 – Parte estacionária e rotativa do motor de indução..... | 39 |
| Figura 7 – Diagrama esquemático e elétrico do MIM de fase dividida. | 40 |
| Figura 8 – Representação do campo magnético girante produzido por duas fontes senoidais desfasadas de 90° em um motor de dois enrolamentos. | 41 |
| Figura 9 – Curvas representativas características de conjugado vs. velocidade angular para dois tipos de MIM conforme a NBR 5383-2:2007..... | 43 |
| Figura 10 – Curva geral de conjugado versus velocidade do MIM após a partida com regiões de operação. | 43 |
| Figura 11 – Diagramas de MIM de fase dividida e características típicas conjugado-velocidade..... | 47 |
| Figura 12 – Circuito equivalente de campos girantes do MIM para um dos dois enrolamentos de estator conforme a IEEE Std 114-2010..... | 48 |
| Figura 13 – Circuito equivalente simplificado do MIM para rotor bloqueado (<i>locked rotor - LR</i>) considerando perdas equivalentes constantes no ferro (R_{IR})..... | 49 |
| Figura 14 – Tipos de enrolamentos. | 51 |
| Figura 15 – Estatores com enrolamento aleatório. | 51 |
| Figura 16 – Subclassificação dos enrolamentos quanto ao seu tipo. | 52 |
| Figura 17 – Esquema de enrolamento de um MIM. | 52 |
| Figura 18 – Seção de estator com enrolamento aleatório, indicando os componentes do sistema de isolamento..... | 53 |
| Figura 19 – Diagrama de seção do estator com elementos do isolamento. | 54 |
| Figura 20 – Identificação visual de danos em enrolamentos de MIM... 58 | |
| Figura 21 – Definição gráfica para tempo de subida (<i>rise-time</i>). | 59 |
| Figura 22 – Medição de resistência a quatro fios no MIM. | 65 |
| Figura 23 – Ensaio de tensão aplicada <i>hipot</i> de CA. | 67 |
| Figura 24 – Configuração básica do teste de surto elétrico. | 68 |

| | |
|---|-----|
| Figura 25 – Sinais característicos de testes de surto em estatores de motores de indução com defeitos tipificados. | 70 |
| Figura 26 – Métodos de análise para o teste de surto. | 71 |
| Figura 27 – Força de Lorentz e Efeito Hall. | 72 |
| Figura 28 – Descargas parciais internas, superficiais e externas. | 76 |
| Figura 29 – Modelo ABC das DP internas. | 78 |
| Figura 30 – Formas de sinais associadas a DP internas para um isolamento sólido. | 78 |
| Figura 31 – Representação do mecanismo de DP numa cavidade de isolamento. | 83 |
| Figura 32 – Circuito de simulação de surto na alimentação que produz DP no modelo ABC. | 84 |
| Figura 33 – Tipos de medições em descargas parciais. | 86 |
| Figura 34 – Circuitos básicos de teste de DP de detecção direta conforme a norma IEC60270. | 91 |
| Figura 35 – Circuito de detecção de DP. | 92 |
| Figura 36 – Diagrama de blocos de um instrumento de medição analógico de DP. | 93 |
| Figura 37 – Diagrama de blocos de instrumentos de medição digital de DP. | 94 |
| Figura 38 – Classificação dos dispositivos de medição de carga aparente de DP. | 95 |
| Figura 39 – Representação de respostas de DP sincronizadas em sinais de corrente alternada senoidal. | 96 |
| Figura 40 – Curva de Paschen para o ar. | 100 |
| Figura 41 – Curvas de Paschen para três gases e para três metais. | 100 |
| Figura 42 – Curvas de tensão de ruptura para diferentes misturas de neônio-argônio para duas placas paralelas separadas de 2 cm com temperatura de 0 °C. | 101 |
| Figura 43 – Tensão de início (PDIV) e amplitude de descarga de DP em função da umidade. | 104 |
| Figura 44 – PDIV em fios condutores trançados em resposta ao aumento da espessura do isolante e a permissividade. | 106 |
| Figura 45 – Seção transversal de dois fios condutores próximos e intensidade de campo elétrico em perfil radial e tangencial. | 108 |
| Figura 46 – Relação entre descarga elétrica e probabilidade de ocorrência de DP com a tensão do pulso aplicado. | 114 |
| Figura 47 – Exemplo de surto aplicado e sinal de DP detectado em um ensaio de surto combinado com DP. | 116 |
| Figura 48 – Queda de tensão na primeira espira de um motor com enrolamento aleatório e distribuição da tensão em enrolamento sujeito a | |

| | |
|---|-----|
| teste de DP (PDIV) usando uma tensão senoidal de 50 Hz e um pulso. | 117 |
| Figura 49 – Tensão entre espiras adjacentes em uma bobina devida a pulso de tensão aplicada. | 118 |
| Figura 50 – PDIV em função da temperatura na ranhura de estator. .. | 119 |
| Figura 51 – Ponto do ensaio de rotor bloqueado (ERB) na curva conjugado <i>versus</i> velocidade do MIM. | 124 |
| Figura 52 – Curvas de conjugado <i>versus</i> velocidade para vários percentuais de tensão nominal. | 126 |
| Figura 53 – Curva de rotor bloqueado para um MIM em ensaio com rotação imposta de 5/60 Hz (5 rpm) para meio giro do eixo. | 128 |
| Figura 54 – Curva de rotor bloqueado em 360° para um MIM com capacitor permanente (PSC). | 129 |
| Figura 55 – Dois estatores da amostra para o ERB. | 134 |
| Figura 56 – Resultado da medição de resistência e indutância dos enrolamentos da amostra. | 135 |
| Figura 57 – Diagrama de blocos do sistema inicial de medição da bancada. | 136 |
| Figura 58 – Evolução do projeto mecânico da BPERB. | 138 |
| Figura 59 – Fonte de potência HP 6812B usada na BPERB. | 142 |
| Figura 60 – Vista parcial da BPERB testada no laboratório. | 143 |
| Figura 61 – Corrente de partida em vazio <i>versus</i> tensão de alimentação para o estator EM117 acoplado com o rotor de teste. | 144 |
| Figura 62 – Efeito da variação da alimentação para dois estatores em ERB. | 145 |
| Figura 63 – ERB para dois estatores da amostra. | 146 |
| Figura 64 – Curva característica corrente-tensão do ERB para EM107. | 146 |
| Figura 65 – Resposta de conjugado para o estator EM108 com três tensões reduzidas de ensaio. | 147 |
| Figura 66 – Resposta do conjugado com filtro Butterworth PB de 4 Hz para o estator EM108 com três tensões de ensaio. | 148 |
| Figura 67 – Resposta de conjugado para o estator EM108 alimentado com 140 V antes e após a filtragem. | 148 |
| Figura 68 – Resposta em corrente pico para ensaio do estator EM108 alimentado a 100 V para três instantes. | 149 |
| Figura 69 – Curva de rotor bloqueado em 40°. | 150 |
| Figura 70 – Resposta de RB em posições próximas a 19° e 24°. | 151 |
| Figura 71 – Respostas de conjugado de RB indicando o tempo de estabelecimento em 0,5 s (ensaio para o estator EM118 alimentado a 100 V). | 152 |

| | |
|---|-----|
| Figura 72 – Resposta de conjugado de RB para dois estatores da amostra..... | 152 |
| Figura 73 – Diagrama de blocos da BPERB implementada. | 153 |
| Figura 74 – Resposta de conjugado no ERB para a amostra..... | 156 |
| Figura 75 – Resposta de corrente no ERB para a amostra. | 157 |
| Figura 76 – Curvas de resposta do conjugado de RB para três estatores da amostra padrão. | 158 |
| Figura 77 – Respostas do conjugado e corrente da amostra e dos estatores EM121 e EM122..... | 159 |
| Figura 78 – Respostas do conjugado e corrente da amostra padrão e do estator EM201..... | 159 |
| Figura 79 – Respostas de conjugado e corrente com estator invertido. | 160 |
| Figura 80 – Respostas de conjugado e corrente do EM122 em condição normal. | 161 |
| Figura 81 – Respostas de conjugado e corrente do EM122 com curto-circuito entre espiras do BP..... | 162 |
| Figura 82 – Respostas de conjugado e corrente do EM122 com curto-circuito entre espiras do BA..... | 162 |
| Figura 83 – Respostas de conjugado e corrente para o estator EM117 com pinos M e S trocados no conector. | 163 |
| Figura 84 – Respostas de conjugado e corrente para o estator EM117 com pinos de M e C trocados..... | 163 |
| Figura 85 – Respostas de conjugado e corrente para o estator EM117 com o pino de S desligado no conector..... | 164 |
| Figura 86 – Respostas de conjugado e corrente para o estator EM117 com pinos M, S e C trocados no conector..... | 164 |

LISTA DE TABELAS

| | |
|--|-----|
| Tabela 1 – Sumário de motores MIM aplicados em condicionamento de ar e refrigeração..... | 46 |
| Tabela 2 – Temperaturas ambientais máximas para condições de ensaio e temperatura de referência conhecida e satisfatória de serviço segundo a classe. | 55 |
| Tabela 3 – Tipos de estresse no motor de indução. | 56 |
| Tabela 4 – Localização de curto-circuitos em um modelo de MIM. | 57 |
| Tabela 5 – Ensaios tipicamente aplicáveis a MIM (estator e rotor acoplados)..... | 60 |
| Tabela 6 – Classificação de ensaios para verificação do desempenho de MIM. | 61 |
| Tabela 7 – Testes típicos em enrolamentos de estatores de motores de indução. | 63 |
| Tabela 8 – Comparação entre métodos de análise para o teste de surto. | 71 |
| Tabela 9 – Especificações do MIM associado a compressor hermético indicando características do estator da amostra. | 134 |
| Tabela 10 – Especificações do transdutor de torque. | 137 |
| Tabela 11 – Especificações do transdutor de corrente de efeito Hall. . | 138 |
| Tabela 12 – Especificações do relé de estado sólido. | 139 |
| Tabela 13 – Especificações do condicionador de sinais usado..... | 140 |
| Tabela 14 – Especificações da placa de aquisição. | 140 |
| Tabela 15 – Tensões de alimentação para a bancada protótipo. | 141 |
| Tabela 16 – Respostas de conjugado e corrente para a amostra | 155 |
| Tabela 17 – Ensaios típicos aplicáveis no estágio de fabricação de estatores..... | 168 |

LISTA DE ABREVIATURAS

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas
AM – Amplitude modulada
ANSI – *American National Standards Institute*
ATA – *Arrival Time Analysis*
BPERB – Bancada Protótipo de Ensaio de Rotor Bloqueado
BA – Enrolamento auxiliar de estator
BP – Enrolamento principal de estator
CA – Corrente alternada
CC – Corrente contínua
CSR – *Capacitor Start and Run*
CST – *Capacitor Start*
DAQ – *Data Acquisition System*
DP – Descargas parciais
ERB – Ensaio de Rotor Bloqueado
EMI – *Electromagnetic Interference*
FPGA – *Field-Programmable Gate Array*
CI – Circuito integrado
IEC – *International Electrotechnical Commission*
IEEE – *Institute of Electrical and Electronic Engineers*
IP – Índice de polarização
ISR – *Inductive Start and Run*
LABMETRO – Laboratório de Metrologia e Automatização, setor do Departamento de Engenharia Mecânica da UFSC
LBP - *Low Back Pressure*
LIAE – Laboratório de Instrumentação e Automação de Ensaios, divisão do LABMETRO
LRA – *Locked Rotor Amperes*
MIM – Motor de indução monofásico com rotor gaiola de esquilo
MCA – *Motor Circuit Analysis*
MCSA – *Motor Current Signature Analysis*
NEMA – *National Electrical Manufacturers Association*
NBR – Normas Brasileiras
NM – Normas Mercosul
NI – National Instruments
PC – *Personal Computer*
PCI – *Peripheral Component Interconnect*
PDEV – *Partial Discharge Extinction Voltage*
PDIV – *Partial Discharge Inception Voltage*
PMA – *Electronic pulse Magnitude Analyzer*

PSC – *Permanent Split Capacitor*, Motor com capacitor permanente

PTC – *Positive Temperature Coefficient*

PWM – *Pulse Width Modulation*

RB – Rotor bloqueado

RI – Resistência de isolamento

RMS – *Root Mean Square*

RSIR – *Resistive Start and Inductive Run*

RTD – *Resistance Temperature Detector*

SI – Sistema Internacional

TDR – *Time-Domain Reflectometry*

UFSC – Universidade Federal de Santa Catarina

UV – Radiação ultravioleta

UR – Umidade relativa

VIM – Vocabulário Internacional de Metrologia

SUMÁRIO

| | | |
|----------|---|-----------|
| 1 | INTRODUÇÃO..... | 29 |
| 1.1 | CONTEXTUALIZAÇÃO..... | 29 |
| 1.2 | OBJETIVOS DO TRABALHO | 31 |
| 1.2.1 | Objetivo geral..... | 31 |
| 1.2.2 | Objetivos específicos | 31 |
| 1.3 | ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO | 32 |
| 2 | O MOTOR DE INDUÇÃO NO COMPRESSOR HERMÉTICO | 33 |
| 2.1 | O COMPRESSOR HERMÉTICO | 33 |
| 2.2 | O MOTOR DE INDUÇÃO..... | 35 |
| 2.2.1 | Classificação de motores..... | 36 |
| 2.2.2 | Motor de indução monofásico | 36 |
| 2.3 | ASPECTOS CONSTRUTIVOS DO MOTOR DE INDUÇÃO MONOFÁSICO | 38 |
| 2.3.1 | Descrição do motor de indução monofásico..... | 38 |
| 2.4 | ASPECTOS DE OPERAÇÃO DO MOTOR DE INDUÇÃO MONOFÁSICO | 39 |
| 2.5 | PARTIDA DO MOTOR DE INDUÇÃO MONOFASICO | 44 |
| 2.5.1 | Motor de indução monofásico de fase auxiliar - ISR | 44 |
| 2.5.2 | MIM com capacitor – CST, PSC e CSR..... | 45 |
| 2.5.3 | Características dos métodos de partida do MIM | 46 |
| 2.5.4 | Modelamento do motor de indução monofásico..... | 48 |
| 2.5.5 | Tipos de enrolamento de estatores..... | 50 |
| 2.5.6 | ISOLAMENTO ELÉTRICO NO ESTATOR | 53 |
| 2.6 | DEFEITOS EM ENROLAMENTOS POR ISOLAMENTO | 55 |
| 2.7 | ENSAIOS APLICÁVEIS A MOTORES MONOFÁSICOS | 60 |
| 2.7.1 | Classificação de ensaios para motores de indução | 60 |
| 2.7.2 | Testes off-line de estatores..... | 62 |
| 2.7.3 | Outros ensaios com rotor acoplado | 63 |
| 2.7.4 | Testes de estatores no estágio de fabricação | 64 |
| 2.7.4.1 | Medição de resistência elétrica..... | 65 |
| 2.7.4.2 | Teste de resistência de isolamento RI..... | 65 |
| 2.7.4.3 | Teste de tensão aplicada (<i>high-potential</i> ou <i>hipot</i>)..... | 66 |
| 2.7.4.4 | Teste de surto elétrico (ou impulso elétrico) | 68 |
| 2.7.4.5 | Teste de sentido de rotação | 72 |
| 2.7.4.6 | Sequência de testes | 73 |
| 2.8 | CONSIDERAÇÕES DO CAPÍTULO | 73 |
| 3 | DESCARGAS PARCIAIS..... | 75 |
| 3.1 | O CONCEITO DE DESCARGAS PARCIAIS..... | 75 |
| 3.1.1 | Tipos de Descargas Parciais | 76 |
| 3.1.1.1 | Descargas internas..... | 76 |

| | | |
|---------------|--|------------|
| 3.1.1.2 | Descargas superficiais..... | 77 |
| 3.1.1.3 | Descargas corona | 77 |
| 3.1.2 | Modelo do fenômeno de DP | 77 |
| 3.1.3 | Grandezas relacionadas às DP..... | 79 |
| 3.1.3.1 | Relacionadas à tensão de ensaio..... | 79 |
| 3.1.3.2 | Relacionadas à ocorrência de DP | 80 |
| 3.1.4 | Mecanismo da ocorrência de DP | 82 |
| 3.2 | DETECÇÃO E MEDIÇÃO DE DESCARGAS PARCIAIS | 84 |
| 3.2.1 | Métodos de detecção | 85 |
| 3.2.1.1 | Detecção não elétrica de DP: acústica, óptica e química..... | 87 |
| 3.2.1.2 | Detecção elétrica de DP: rádio interferência | 88 |
| 3.2.1.3 | Detecção elétrica de DP: corrente, tensão e carga aparente | 89 |
| 3.2.2 | Medição da carga aparente | 90 |
| 3.2.2.1 | Circuitos de teste e medição de carga aparente de DP | 90 |
| 3.2.2.2 | Instrumentos de medição de DP..... | 92 |
| 3.2.2.3 | Medições em objetos com enrolamentos e cabos | 96 |
| 3.2.2.4 | Erros na medição de sinais digitalizados..... | 98 |
| 3.3 | CONDIÇÕES QUE INTERVÊM NA ATIVIDADE E DETECÇÃO DE DESCARGAS PARCIAIS | 99 |
| 3.3.1 | Presença de gases no entorno..... | 101 |
| 3.3.2 | Frequência e polaridade da tensão aplicada..... | 101 |
| 3.3.3 | Meio ambiente – umidade e temperatura | 103 |
| 3.3.4 | Materiais e geometria do sistema de isolamento | 105 |
| 3.3.5 | Materiais e geometria dos eletrodos (fios condutores e núcleo de ferro) | 107 |
| 3.3.6 | Efeito pelicular (<i>skin effect</i>)..... | 109 |
| 3.3.7 | Ruídos | 109 |
| 3.3.8 | Radiação..... | 110 |
| 3.3.9 | Comprimento dos cabos de conexão..... | 110 |
| 3.3.10 | Aspectos construtivos | 111 |
| 3.3.11 | Natureza estocástica de algumas propriedades das DP..... | 112 |
| 3.4 | POSSIBILIDADES E DIFICULDADES NA INTERPRETAÇÃO OBJETIVA DOS DADOS DE DESCARGAS PARCIAIS | 112 |
| 3.5 | APLICABILIDADE EM ENROLAMENTOS ALEATÓRIOS DE BAIXA TENSÃO | 115 |
| 3.6 | CONSIDERAÇÕES DO CAPÍTULO | 120 |
| 3.6.1 | Conveniência do ensaio de descargas parciais..... | 120 |
| 3.6.2 | Dificuldades do ensaio de descargas parciais | 121 |
| 4 | ENSAIO DE ROTOR BLOQUEADO | 123 |
| 4.1 | CARACTERÍSTICAS DO ENSAIO DE ROTOR BLOQUEADO PARA O MOTOR DE INDUÇÃO MONOFÁSICO | 123 |
| 4.1.1 | Conjugado com rotor bloqueado | 125 |
| 4.1.2 | Variação da resposta com a tensão de ensaio | 126 |
| 4.1.3 | Variação da resposta com a posição do rotor | 126 |

| | | |
|--------------|--|------------|
| 4.1.3.1 | Eixo de torção ou rotação imposta | 127 |
| 4.1.3.2 | Bloqueado ponto a ponto..... | 128 |
| 4.1.4 | Variação da resposta com a temperatura | 129 |
| 4.2 | CONSIDERAÇÕES PARA REALIZAR O ENSAIO DE ROTOR BLOQUEADO..... | 130 |
| 4.2.1 | Possibilidades na detecção de defeitos | 131 |
| 4.2.2 | Dificuldades na detecção de defeitos..... | 132 |
| 4.3 | BANCADA PROTÓTIPO PARA ENSAIO DE ROTOR BLOQUEADO..... | 133 |
| 4.3.1 | Caracterização da amostra padrão | 133 |
| 4.3.2 | Instrumentação do sistema de medição da bancada protótipo para ensaio de rotor bloqueado (BPERB)..... | 136 |
| 4.3.2.1 | Projeto mecânico e medição de conjugado..... | 136 |
| 4.3.2.2 | Medição de corrente e acionamento elétrico | 137 |
| 4.3.2.3 | Condicionamento e aquisição de sinais | 139 |
| 4.3.2.4 | Fontes de alimentação | 141 |
| 4.3.2.5 | Medição de temperatura e resistência..... | 142 |
| 4.3.3 | Medidas para melhorar a repetibilidade e reprodutibilidade | 143 |
| 4.4 | ENSAIOS PRELIMINARES..... | 144 |
| 4.4.1 | Definição da tensão do ensaio..... | 144 |
| 4.4.2 | Resposta de conjugado..... | 147 |
| 4.4.3 | Variação da resposta de corrente no tempo..... | 148 |
| 4.4.4 | Definição da posição angular relativa entre rotor e estator | 149 |
| 4.4.5 | Medições de conjugado e corrente | 151 |
| 4.4.6 | Diagrama de blocos da bancada protótipo de ensaio de rotor bloqueado..... | 152 |
| 4.4.7 | Procedimento de ensaios..... | 153 |
| 4.5 | RESPOSTA DE CONJUGADO E CORRENTE DE ROTOR BLOQUEADO PARA A AMOSTRA | 155 |
| 4.5.1 | Avaliação de peças fora do padrão da amostra | 158 |
| 4.5.2 | Avaliação com defeitos fabricados..... | 160 |
| 4.5.2.1 | Giro invertido | 160 |
| 4.5.2.2 | Curto circuito entre espiras..... | 161 |
| 4.5.2.3 | Erro no conector do estator | 162 |
| 4.6 | CONSIDERAÇÕES DO CAPÍTULO | 164 |
| 5 | CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS..... | 165 |
| 5.1 | CONSIDERAÇÕES | 165 |
| 5.2 | CONCLUSÕES | 166 |
| 5.2.1 | Ensaio de descargas parciais..... | 166 |
| 5.2.2 | Ensaio de rotor bloqueado | 167 |
| 5.3 | SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS..... | 169 |
| 5.3.1 | Descargas parciais..... | 169 |
| 5.3.2 | Ensaio de rotor bloqueado | 170 |

| | | |
|-------|-----------------------------------|-----|
| 5.3.3 | Outras sugestões..... | 171 |
| 6 | REFERÊNCIAS..... | 173 |
| | APÉNDICE – NORMAS E PADRÕES | 189 |

1 INTRODUÇÃO

1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO

Algumas características típicas do motor elétrico de indução, como construção relativamente simples, robustez e mínimo desgaste, contribuíram para que essa classe de máquinas girantes se tornasse aplicável a uma vasta gama de atividades [1], acionando infinidade de mecanismos e sistemas nos mais diferentes setores da sociedade.

O advento do motor de indução, ocorrido em 1889, foi impulsionado por uma sequência mundial de eventos e desenvolvimentos científicos, iniciada em 1820, quando o dinamarquês Hans Cristian Oersted relacionou campo elétrico e magnético, mediante experimentação.

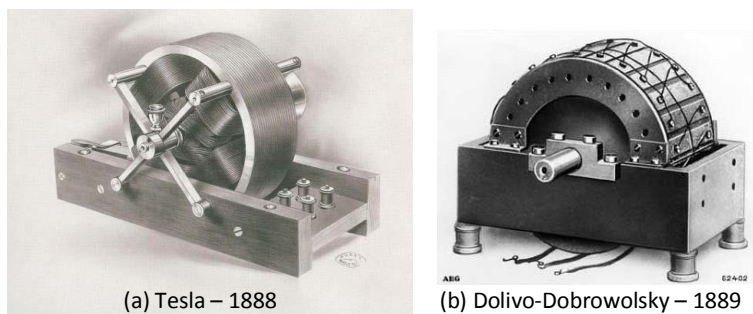
Em 1825, o francês François Arago demonstrou que um disco de cobre giratório produz rotação em uma agulha magnetizada pendurada sobre ele [2], e, em 1827, o francês André-Marie Ampère formulou a teoria do eletromagnetismo. O britânico Michael Faraday, a partir de seus experimentos e observações sobre indução eletromagnética, em 1831 construiu o primeiro motor elétrico – em corrente contínua – e desenvolveu a teoria do eletromagnetismo [3]. Entre 1885 e 1888, em pesquisas e trabalhos inéditos, o italiano Galileo Ferraris estabeleceu os princípios dos campos magnéticos girantes. No ano de 1888, o austro-húngaro Nikola Tesla apresentou seu motor de indução de corrente alternada (figura 1a) alimentado por dois geradores, baseado nas suas experiências do campo magnético girante. Na discussão da apresentação de Tesla, o professor britânico Elihu Thomson propôs um tipo de motor que operaria com um só circuito de corrente alternada [4]. Um ano depois, o motor de indução trifásico com rotor de gaiola de esquilo, do russo Mikhail von Dolivo-Dobrowolsky, foi patenteado [5] (figura 1b).

Em virtude da simplicidade e robustez do rotor gaiola de esquilo [1], o motor de indução (ou assíncrono) alcançou e mantém sua posição de preferido pela indústria para diversas aplicações – em pequeno, médio e grande porte –, com potências que vão desde frações até milhares de quilowatts [6]. O conjunto de compressores associados aos sistemas termodinâmicos é um dos maiores expoentes da aplicação de máquinas assíncronas de potências fracionárias (abaixo de 1 kW)

As concepções dos sistemas de refrigeração de Marcel Audiffren, na década de 1890, e posteriormente de Douglas Henry Stokes, em

1916, apresentavam o problema de controle do vazamento de refrigerante. Clark Orr, em 1926, concebeu um sistema hermético para as unidades de refrigeração OC-2, que teve mais de 2000 unidades produzidas pela General Electric. O compressor do OC-2 incluía um motor monofásico de indução de fase dividida com rotor gaiola de esquilo, capaz de acionar o sistema mecânico de compressão e suportar as condições internas de temperatura, além de resistir às substâncias solventes usadas como fluidos refrigerantes [7]. Superou-se assim o problema de vazamento e se lançaram as bases para o atual modelo de compressor hermético com motor de indução, largamente utilizado em refrigeração e condicionamento de ar [8] comercial e residencial.

Figura 1 – Motor de indução de Tesla de 1888 e motor de indução trifásico gaiola de esquilo de Dolivo-Dobrowolsky de 1889.



Fonte: a) [9] e b) [5].

O expressivo volume de produção de compressores, em milhões de unidades anuais, é um forte indicativo de que o motor de indução é a mais comum das máquinas girantes. Empresas como a Embraco e a Danfoss Compressors GmbH possuem capacidade produtiva anual superior a 30 [10] e 10 milhões [11] de unidades, respectivamente.

As recentes demandas impostas pelo mercado globalizado, de produtos com qualidade assegurada, têm exigido empenho adicional das indústrias em procedimentos que garantam essa condição, sem comprometer o tempo de produção [12]. A dificuldade em atender tais requisitos é muito maior em plantas com elevado fluxo de produção, caso da empresa parceira neste trabalho, líder mundial na fabricação de compressores herméticos.

Para manter sua forte colocação no mercado [13], a empresa fabricante de compressores tem despendido muito esforço em controle

de qualidade, o que inclui a avaliação de cada uma das unidades de estatores produzidas para os motores de indução associados. Entretanto, a velocidade do processo produtivo inviabiliza a aplicação de procedimentos mais elaborados, restringindo a análise a testes mais rápidos.

O contexto posto acima evidencia a necessidade de estabelecer mecanismos capazes de se adequarem aos procedimentos empregados atualmente, permitindo controle de qualidade mais efetivo de cada uma das unidades produzidas. Assim, propõe-se avaliar a aplicabilidade de dois métodos de detecção de defeitos em estatores no controle de produção atual. Os objetivos relacionados à proposta estão apresentados na seção seguinte.

1.2 OBJETIVOS DO TRABALHO

1.2.1 Objetivo geral

O objetivo deste trabalho é sistematizar informações sobre dois métodos de ensaio – descargas parciais e rotor bloqueado – e analisar a aplicabilidade de tais ensaios no controle da qualidade na fabricação de estatores de motores de indução monofásicos associados a compressores herméticos de refrigeração.

1.2.2 Objetivos específicos

- Analisar os conceitos básicos do fenômeno de descargas parciais, suas características principais, os fatores que intervêm na sua atividade e detecção, e sua utilidade como ensaio de rotina de controle da qualidade na produção de estatores de baixa tensão;
- projetar, construir e avaliar uma bancada de testes protótipo, capaz de realizar ensaio de rotor bloqueado em um modelo de estator monofásico empregado em compressores herméticos comerciais;
- analisar respostas de corrente e de conjugado (torque) obtidas em ensaios de rotor bloqueado de uma amostra padrão e compará-las com aquelas produzidas por peças com desvios característicos do processo de fabricação de estatores monofásicos do mesmo modelo;
- apresentar as vantagens e desvantagens dos métodos de ensaio sob estudo, com o intuito de avaliar seu potencial de aplicação na detecção de desvios no estágio de fabricação de estatores.

1.3 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

Esta dissertação está estruturada em cinco capítulos.

No capítulo 2, apresenta-se a teoria básica do motor de indução monofásico associado a compressores herméticos de refrigeração. Destacam-se aspectos construtivos e operacionais, defeitos típicos e ensaios comumente aplicados para detecção de desvios do sistema de isolamento, no estágio de fabricação.

No capítulo 3, discorre-se sobre a teoria das descargas parciais, com base em ampla pesquisa na literatura técnica e científica. Apresentam-se o modelamento básico, condições que intervêm na atividade das descargas parciais e formas de detecção, visando sua aplicação como *checkpoint* adicional nas linhas de produção de estatores monofásicos de baixa tensão.

No capítulo 4, caracteriza-se o ensaio de rotor bloqueado e avaliam-se as condições para sua realização. São destacados os requisitos do projeto de uma bancada protótipo para aplicação do ensaio, bem como são abordados aspectos relevantes à sua construção e operação. Adicionalmente, discutem-se resultados obtidos a partir de amostra de estatores.

Por fim, no capítulo 5, apresentam-se as conclusões do trabalho, em relação aos objetivos previamente definidos e aos resultados alcançados, assim como as sugestões e recomendações para trabalhos futuros.

2 O MOTOR DE INDUÇÃO NO COMPRESSOR

HERMÉTICO

O intuito deste capítulo é apresentar a teoria básica do motor de indução monofásico como parte constituinte de uma classe bastante significativa de compressores herméticos alternativos, para aplicações em refrigeração, resfriamento e condicionamento de ar. Com base em algumas referências clássicas da literatura técnica sobre motores elétricos de indução, como também em publicações recentes, apresentar-se-ão conceitos básicos, terminologia e aspectos construtivos que serão utilizados ao longo do trabalho, visando facilitar a sua compreensão.

2.1 O COMPRESSOR HERMÉTICO

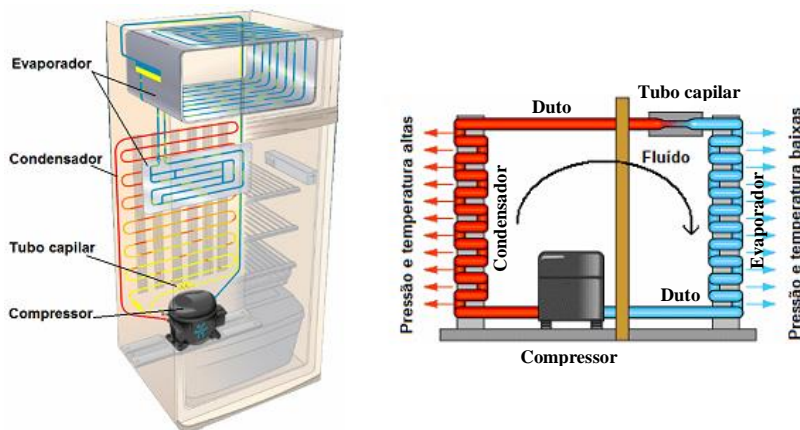
O objetivo de um sistema de refrigeração é a transferência de calor de um volume de contorno para outro, ocasionando uma diferença de temperatura entre os dois ambientes [14]. Para tal fim, em um sistema mecânico de refrigeração, é necessário um conjunto de equipamentos arranjados de forma adequada em um circuito de refrigeração composto basicamente por compressor, condensador, dispositivo de expansão, evaporador e dutos [14][15], como representado na figura 2, além do fluido refrigerante [8], encarregado da troca de calor entre ambientes.

A pressão do fluido é controlada por dois elementos, o compressor e o dispositivo de expansão, que dividem o circuito em um lado de alta pressão (condensador) e um de baixa pressão (evaporador). O dispositivo de expansão (tubo capilar, geralmente utilizado em sistemas de pequeno e médio porte) oferece resistência à circulação de fluido, fazendo com que a pressão diminua. O compressor tem a função de forçar a circulação de refrigerante aumentando sua pressão [14]. Assim, o ciclo de refrigeração ocorre com a compressão do vapor pelo compressor; liquefação após compressão, pela remoção de calor no condensador; expansão e evaporação, com a troca de calor do ambiente externo ao fluido que circula no interior do evaporador [8].

Existem vários tipos de compressores e os alternativos são os que têm maior aplicação em refrigeração doméstica e comercial. Tais dispositivos são baseados em sistemas biela-manivela, acionados por um motor elétrico rotativo. O uso desse sistema mecânico, capaz de

converter o movimento rotativo do eixo do motor em movimento translacional do pistão para a compressão do fluido refrigerante, confere a tais dispositivos alta confiabilidade e baixo custo de fabricação [16].

Figura 2 – Partes básicas de um sistema de refrigeração doméstico e circuito de refrigeração.



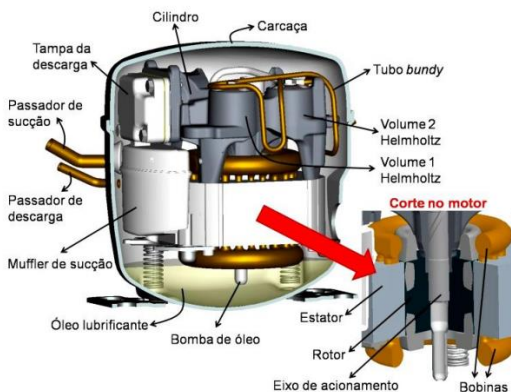
Fonte: Adaptado de [16].

Os compressores alternativos comportam estruturalmente três mecanismos ou sistemas: sucção, compressão e descarga [17]. Os seus componentes internos podem ser divididos em mecânicos e elétricos, acoplados entre si por meio do eixo [18]. No sistema de refrigeração por compressão de vapor, o fluido refrigerante vindo do evaporador entra inicialmente no compressor através do filtro acústico (*muffler*) de sucção e então é admitido na câmara de compressão. Após ser comprimido, o fluido é direcionado para a câmara de descarga, a qual é conectada a volumes com a função de ressonadores de Helmholtz, para a diminuição da pulsação de pressão do escoamento. Finalmente, o fluido escoar através do tubo *bundy* e sai do compressor em direção ao condensador [19]. A parte elétrica, composta por motor, cabos de ligação e terminal elétrico, tem a função de converter a energia elétrica em mecânica pelo movimento rotativo do eixo que será transmitido ao sistema de compressão do fluido.

Os compressores alternativos são construídos em concepções distintas. Os elementos do tipo hermético são muito empregados em refrigeração doméstica e comercial (figura 3). São assim denominados

por comportarem o conjunto eletromecânico em carcaça hermeticamente selada (blindada), evitando o vazamento do fluido refrigerante [17] e confinando o óleo para lubrificação hidrodinâmica, o qual é levado às peças mecânicas sujeitas ao desgaste por atrito [19].

Figura 3 – Componentes de um compressor alternativo hermético.



Fonte: [17].

O motor de indução monofásico com rotor gaiola de esquilo (MIM) é o componente motriz de uma classe bastante significativa dos compressores herméticos [13] comumente com potência variando entre 30 W e 700 W [16] em sistemas de refrigeração doméstica e comercial.

Na seção a 2.2 se apresenta uma sucinta introdução do motor de indução, aliás de sua classificação e o enquadramento do MIM –usado em refrigeração – na extensa variedade de máquinas elétricas rotativas existente.

2.2 O MOTOR DE INDUÇÃO

De todos os tipos de motores elétricos de corrente alternada, o motor assíncrono ou de indução é o mais popular e amplamente empregado [20]. Em função do número de unidades produzidas anualmente, o motor de indução monofásico assume a liderança, embora o motor de indução trifásico ocupe o primeiro lugar em termos de capacidade de potência e valor de mercado [21]. Na seção 2.2.1 se apresenta uma classificação geral dos motores elétricos para depois focar no motor de indução monofásico com rotor gaiola de esquilo

(MIM), componente fundamental dos compressores herméticos comumente fabricados no mundo [16].

2.2.1 Classificação de motores

Inúmeras topologias de motores elétricos têm sido desenvolvidas ao longo da história para a satisfação de diferentes necessidades [16]. Na figura 4, na página seguinte, se apresenta uma classificação para motores elétricos baseada em Hanselman [22] e nos fabricantes de motores Weg [23] e Kcel [24], onde se destaca na cor cinza os principais tipos de motores aplicados na indústria. Diante desse universo de máquinas elétricas, o motor de indução monofásico com rotor gaiola de esquilo (MIM) é o que tem o uso mais difundido, devido principalmente as vantagens de inerente simplicidade de construção e controle, seu baixo custo e adaptabilidade a ambientes agressivos [13].

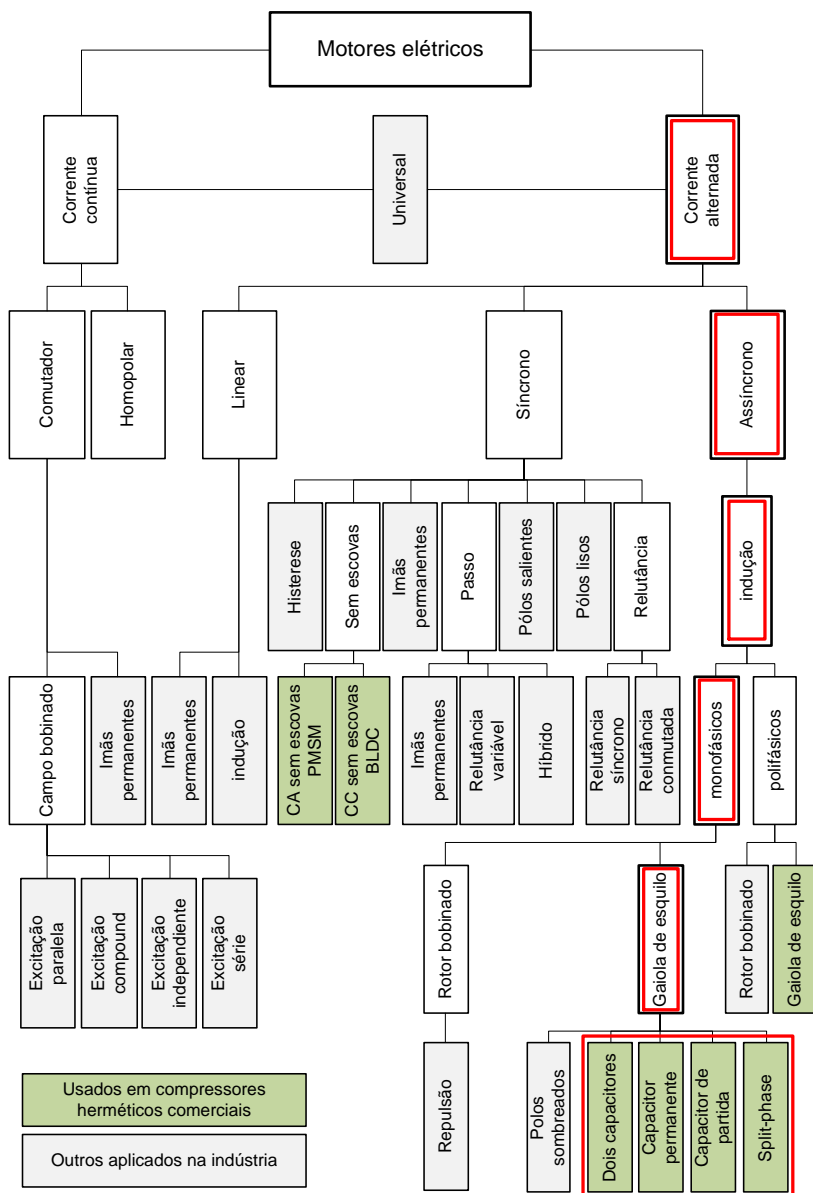
Os MIM necessitam de algum método auxiliar de partida, pois não podem arrancar diretamente como as máquinas de indução trifásicas. Dependendo da estratégia utilizada eles podem ser classificados em fase auxiliar simples (*split-phase*), capacitor de partida, capacitor permanente e dois capacitores – todos com enrolamentos distribuídos – e polos sombreados – com enrolamentos concentrados – [16] conforme ilustrado na figura 4, onde, se destaca a linha da família a que pertencem. Ainda, aqueles MIM com enrolamento distribuído são considerados de fase dividida, pois todos eles usam dois enrolamentos como será visto mais à frente (seção 2.4, página 39).

2.2.2 Motor de indução monofásico

Chama-se de motor de indução por serem induzidas correntes em um enrolamento secundário (rotor) pela ação dos campos magnéticos causados pelo fluxo de corrente em um enrolamento primário (estator); monofásico, pois é o tipo de tensão que alimenta os enrolamentos do estator; e, por fim, rotor gaiola de esquilo, visto que seus condutores são arrançados de maneira semelhante a uma gaiola cilíndrica para exercitar esquilos [20].

Os MIM são usualmente empregados em aplicações de baixa potência (inferior a 2,2 kW) e velocidade constante, em locais onde se disponibiliza de rede elétrica monofásica como em áreas residências, rurais e algumas instalações industriais [13][16].

Figura 4 – Classificação de motores elétricos destacando a família dos MIM sob estudo e os usados em compressores herméticos de refrigeração.



Fonte: Adaptado de [22], [23], [24].

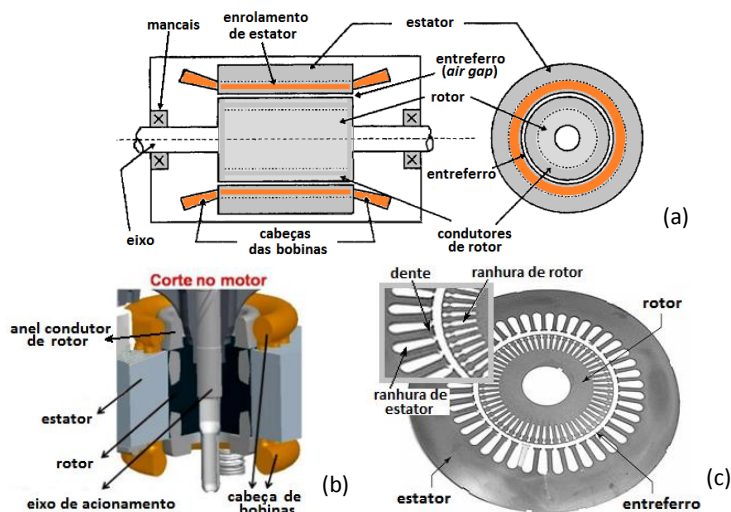
As tensões monofásicas padronizadas no Brasil são 127 V e 220 V [23], de tal modo que os motores monofásicos podem ser ligados a duas fases (tensão de linha) ou a uma fase e o neutro (tensão de fase), tomando cuidado que a tensão aplicada ao motor monofásico corresponda com sua tensão nominal – igual a uma dessas duas tensões do sistema [13] –. No mundo, a grandeza da tensão elétrica monofásica varia de 100 V a 240 V de acordo com as normas vigentes em cada país. Compressores herméticos são comumente fabricados para operarem em tensões de corrente alternada de 115 V, 127 V, 220 V e 240 V [25].

2.3 ASPECTOS CONSTRUTIVOS DO MOTOR DE INDUÇÃO MONOFÁSICO

2.3.1 Descrição do motor de indução monofásico

Na figura 5 estão representadas simplificadaamente as partes principais de uma máquina elétrica girante, (a); um corte do MIM (b), para facilitar sua visualização interna; e um par de lâminas (c), tipicamente empregado no rotor e no estator. A ilustração permite identificar a parte rotativa, a parte estacionária e o entreferro.

Figura 5 – Partes do motor de indução monofásico (MIM).



(a) partes principais, (b) corte do MIM e (c) lâminas de rotor e estator.

Fonte: Adaptado de [17], [26] e [27].

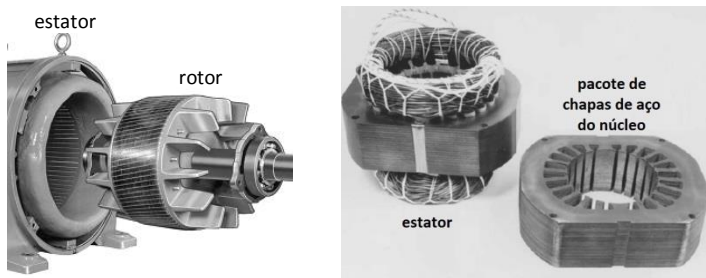
O rotor é formado pelas barras condutoras, dispostas em forma de gaiola cilíndrica, e o núcleo magnético, formado pelas chapas de aço – figura 6(a) –. É a parte girante da máquina, acoplada ao eixo, o qual é suportado pelos mancais ou rolamentos [26].

A parte estacionária ou estator é constituída da carcaça ou suporte; do estator – figura 6(b) –, formado pelo núcleo ou pacote de chapas de aço laminadas e enrolamentos – que sobressaem do núcleo formando a cabeça de bobina (*end-winding*) –; e de elementos elétricos de conexão e controle de partida [26][27]. O enrolamento é o conjunto de bobinas que cria ou é influenciado por um campo magnético, segundo a norma ABNT NBR 5457 [28].

Por fim, o espaço definido entre o estator e rotor é denominado entreferro (*air gap*), com um comprimento físico muito menor do que o radio do rotor. O motor trabalha pela produção de uma tensão de cisalhamento mecânica (*shear stress*) no entreferro [27].

Informações mais detalhadas sobre aspectos construtivos dos motores, como geometria, dimensões, materiais e procedimento de enrolamento, podem ser obtidos nos trabalhos de Giesel [16], Eggert [29], Veinott [20], Beaty e Kirtley [26], Fitzgerald *et al.* [30] e Yeadon e Yeadon [31].

Figura 6 – Parte estacionária e rotativa do motor de indução.



(a) aspecto típico de rotor de gaiola (b) estator e chapas laminadas do núcleo.

Fonte: Adaptado de [27] e [31].

2.4 ASPECTOS DE OPERAÇÃO DO MOTOR DE INDUÇÃO MONOFÁSICO

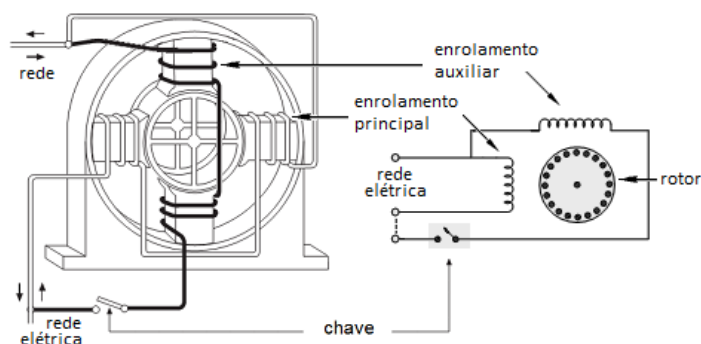
A aplicação de uma tensão monofásica senoidal nos enrolamentos de estator produzirá igualmente uma corrente senoidal, criando um campo magnético bipolar norte-sul. O campo criado, estabelecido pelos

polos magnéticos do enrolamento tem uma distribuição espacial no entreferro próxima a uma senoide, que varia de intensidade proporcionalmente conforme o valor instantâneo da corrente. Assim, o campo resultante é de tipo pulsante, pois sua intensidade varia sempre na mesma direção norte-sul [13][23].

Com o rotor parado, o campo magnético pulsante é incapaz de imprimir rotação ao eixo, demandando circuito auxiliar para gerar “conjugado” necessário para a rotação inicial e aceleração [24]. Conjugado é o termo normalizado para expressar a grandeza momento de uma força em motores elétricos segundo a NBR 17094-2 [32], comumente chamado como torque, e se expressa em Nm(newton metro) de acordo com o Sistema Internacional de Unidades (SI) [33].

O circuito que insere o enrolamento auxiliar durante a partida para criar deslocamento de fase e produzir conjugado no MIM [24], está representado na figura 7.

Figura 7 – Diagrama esquemático e elétrico do MIM de fase dividida.

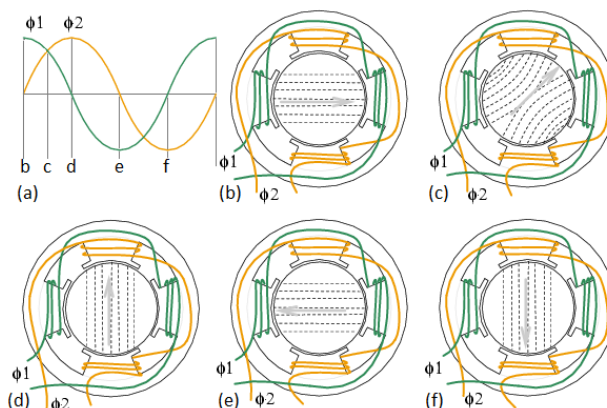


Fonte: Adaptado de [34] e [35].

Considerando-se o MIM como um motor bifásico (do tipo apresentado por Sir Nikola Tesla em 1888 [4]) e seus dois enrolamentos, principal e auxiliar, ligados a uma rede elétrica de duas fases deslocadas de 90° elétricos ($\pi/2$), como representado na figura 8, então a rotação do campo magnético nos enrolamentos giraria no sentido horário.

Considerando-se as correntes aplicadas (figura 8(a)), a sequência delas teria o seguinte comportamento: (b) ϕ_1 máxima, ϕ_2 zero; (c) ϕ_1 70%, ϕ_2 70%; (d) ϕ_1 zero, ϕ_2 máxima; (e) ϕ_1 máxima negativa, ϕ_2 zero; (f) ϕ_1 zero, ϕ_2 máxima negativa [36], produzindo a rotação do campo em sentido anti-horário.

Figura 8 – Representação do campo magnético girante produzido por duas fontes senoidais desfasadas de 90° em um motor de dois enrolamentos.



(a) sinais desfasados de 90° e efeito para (b) 0° , (c) 45° , (d) 90° , (e) 180° e (f) 270° .

Fonte: Adaptado de [36].

Existem duas abordagens para explicar o funcionamento do MIM alimentado a partir de uma rede monofásica, a teoria dos campos giratórios – também aplicável a máquinas polifásicas – e a teoria dos campos cruzados [20]. O MIM constituído de dois enrolamentos, auxiliar (BA) e principal (BP), deslocados entre si de 90° no espaço (em quadratura) [21], é considerado em ambas as teorias como um motor bifásico com enrolamentos assimétricos [30] na partida, ou seja, com número diferente de espiras para cada enrolamento de fase (nessa abordagem os enrolamentos BA e BP).

A teoria dos campos girantes considera o conjugado resultante produzido no MIM como resultado de dois componentes de rotação em sentidos opostos (direto – *forward* – e reverso – *backward* – [21]), mas constantes em magnitude. A teoria dos campos cruzados considera, por sua vez, o conjugado como resultado de dois componentes de diferentes graus de magnitude, mantendo o mesmo sentido de rotação [37].

Trabalhos recentes desenvolvidos na UFSC como Ruthes (2008) [21] e Lima (2010) [38] tratam o assunto, o qual é amplamente desenvolvido em livros como os de Yeadon e Yeadon (2001) [31], Fitzgerald *et al.* (2008) [30], Chapman [39], e mais outros, baseados em publicações originais de West (1926) e Morrill (1929) [40], nos estudos de Button (1949) [37] e nos compêndios clássicos de Veinott (1959 e 1970) [41].

A velocidade angular do campo girante no motor de indução é conhecida como velocidade síncrona. A velocidade síncrona n_s é sempre determinada pela frequência de alimentação f e o número de pares de polos que induzem o campo por ciclo, segundo a equação (1).

$$n_s = \frac{2\pi \cdot f}{\text{pares de polos}} \quad (1)$$

A unidade SI para velocidade angular é o radiano por segundo (rad/s), cujo valor numérico é 2π vezes o valor numérico da frequência correspondente em hertz [33], embora a unidade convencional rpm (revoluções por minuto) seja comumente empregada. Assim, 3600 rpm = 60 Hz = 376,99 rad/s.

Em regime permanente, o rotor de um MIM gira cerca de 5% abaixo da velocidade angular síncrona (n_s) do campo eletromagnético do estator [31].

Define-se como escorregamento s , do rotor em relação a o campo eletromagnético, a diferença entre n_s e a velocidade do rotor n [30][31]. É assim que, pelo escorregamento, se pode produzir indução de corrente no rotor, e, após a partida, gerar o conjugado de funcionamento [8].

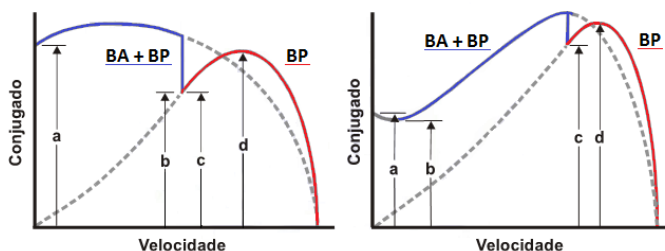
O escorregamento S é usualmente expresso em fração da velocidade síncrona n_s , segundo a equação (2) [30],

$$S = \frac{n_s - n}{n_s} . \quad (2)$$

O escorregamento vai ser máximo ($S = 1$) se o MIM estiver energizado e o rotor permanecer parado ou travado; nominal ($S \approx 0,05$) quando o conjugado de operação for atingido; e mínimo ($S = 0$) se a velocidade síncrona for alcançada.

No funcionamento do MIM, o enrolamento auxiliar (BA) fica em paralelo ao enrolamento principal (BP) durante a partida, operando como um motor polifásico desbalanceado de dois enrolamentos [31]. Quando um valor próximo ao conjugado máximo for alcançado, uma chave, ativada por corrente ou ativada por velocidade angular (centrífuga), desativa BA – abrindo seu circuito o minimizando o seu efeito – deixando energizado só o BP, configurando o motor como monofásico. Na figura 9 se representam as curvas do MIM, segundo a NBR 5383-2:2007 [42], indicando em azul a condição do MIM com BA em paralelo a BP, e em vermelho, BP após a chave desligar BA.

Figura 9 – Curvas representativas características de conjugado vs. velocidade angular para dois tipos de MIM conforme a NBR 5383-2:2007.



Legenda:

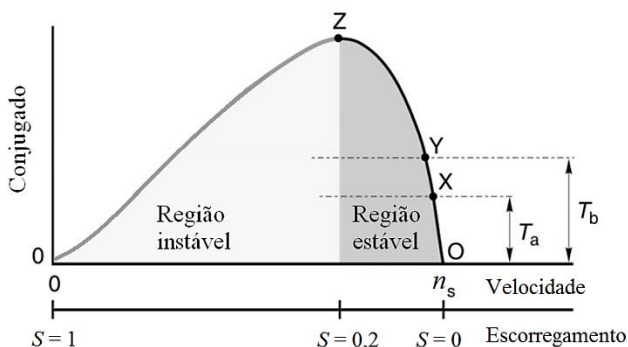
BA enrolamento auxiliar
BP enrolamento principal
a conjugado com rotor bloqueado

b conjugado mínimo de partida
c conjugado de chaveamento
d conjugado máximo

Fonte: Adaptado de [42].

A figura 10 ilustra a curva característica do MIM quanto ao conjugado versus velocidade, após a partida e chaveamento do enrolamento auxiliar.

Figura 10 – Curva geral de conjugado versus velocidade do MIM após a partida com regiões de operação.



Legenda:

n_s velocidade síncrona (do campo girante)
O ponto de operação sem conjugado de carga
X ponto de operação para conjugado de carga T_a
Y ponto de operação para conjugado de carga T_b
Z ponto de operação de conjugado máximo do motor

Fonte: Adaptado de [8].

A operação do motor é estável na região indicada com o ponto X. Se o conjugado de carga aumentar de T_a para T_b , o motor irá desacelerar, fazendo com que seu conjugado aumente de X para Y [8].

Considerando-se que o conjugado de carga continue crescendo, atingir-se-á o ponto Z, relativo ao maior conjugado desenvolvido pelo motor. Esse ponto de operação se caracteriza pela sobrecarga do motor e consequente sobreaquecimento. Caso o conjugado de carga continue aumentando, a frequência rotacional diminuirá, com consequente aumento do escorregamento, até que se atinja um ponto em que a frequência rotacional decresça rapidamente até que se torne nula, quando será caracterizado o tombamento do motor [8].

Os princípios básicos do circuito de partida, que configura o tipo de MIM, serão considerados na seguinte seção.

2.5 PARTIDA DO MOTOR DE INDUÇÃO MONOFASICO

Como visto na seção anterior, o MIM precisa incluir um mecanismo para auxiliar a partida e gerar conjugado quando ligado.

A seguinte classificação é amparada pela norma ABNT NBR 17094 [32] cujo nome do tipo de MIM refere o método de partida [38]:

- a) fase auxiliar – *split-phase* (ISR – *Inductive Start and Run*);
- b) capacitor de partida (CST – *Capacitor Start*);
- c) capacitor permanente (PSC – *Permanent Split Capacitor*);
- d) capacitor de dois valores (CSR – *Capacitor Start and Run*);
- e) polos sombreados ou de campo distorcido (*shaded-pole*).

O MIM de polos sombreados, apresenta baixo conjugado de partida, baixo rendimento, baixo fator de potência, normalmente fabricados para pequenas potências [24] com poucas aplicações importantes [26] e sem literatura disponível que relacione seu uso em compressores herméticos, por tanto, fora do escopo deste trabalho.

2.5.1 Motor de indução monofásico de fase auxiliar - ISR

Constituído de um enrolamento principal (BP) conectado diretamente à rede de alimentação e um enrolamento auxiliar (BA) desfasado, geralmente, de 90° elétricos de BP, esse motor também é conhecido como de fase dividida. Não necessita nenhuma outra impedância, senão aquela própria dos enrolamentos, sendo que BA está inserido de forma ativa no circuito de alimentação somente durante o período de partida do motor [32][42].

Normalmente a relação entre resistência e reatância do BA é maior do que a mesma relação para BP. Os enrolamentos são projetados assim para estabelecerem defasagem temporal da corrente, fazendo com que para BA esteja adiantada em relação à corrente do BP [21], resultando em campo girante de estator, permitindo a partida do motor [38]. Desse modo, o MIM de fase auxiliar (ISR) parte como um motor bifásico desequilibrado até atingir entre 75% e 80% da velocidade síncrona, muito próximo ao conjugado máximo que ele pode alcançar [8][13][20] em regime permanente.

A densidade de corrente no enrolamento auxiliar é tão alta durante o período de partida que o consequente incremento de temperatura inviabiliza reinícios frequentes ou cargas que demandem partida lenta [36]. Em regime permanente trabalha apenas com o enrolamento principal e, por isso, apresenta fator de potência relativamente baixo [21] logo após a partida.

Esses tipos de motores monofásicos são os mais amplamente empregados na faixa de 100 W a 1 kW. São usados em equipamento de lavanderia, queimadores de combustível, sopradores de caldeiras, ventiladores, bombas centrífugas, compressores, moedores, polidoras e outras ferramentas, entre muitas outras aplicações que requeiram um conjugado moderado [20][43].

2.5.2 MIM com capacitor – CST, PSC e CSR

Para melhorar o conjugado que o MIM de fase auxiliar pode fornecer, durante a partida ou em operação contínua, são empregados, por vezes, um ou dois capacitores que introduzem impedância adicional aos enrolamentos do motor, de forma temporária ou permanente, modificando a capacidade para acionamento de cargas e a eficiência relativa do motor [35].

Esses capacitores, conectados ao circuito auxiliar como será visto na seguinte subseção, produzem um deslocamento de fase entre a corrente de BA e BP, maior ou menor dependendo de sua capacitância e configuração com os enrolamentos, para produzir o conjugado que demanda uma determinada aplicação, e, modificando por tanto, o desempenho do MIM na partida e em regime [24].

2.5.3 Características dos métodos de partida do MIM

A determinação do método a ser utilizado (ISR, CST, PSC ou CSR) é função do conjugado nominal demandado pela aplicação. Na tabela 1 estão relacionados tipos de motores às classes de aplicações em refrigeração e condicionamento de ar.

Tabela 1 – Sumário de motores MIM aplicados em condicionamento de ar e refrigeração.

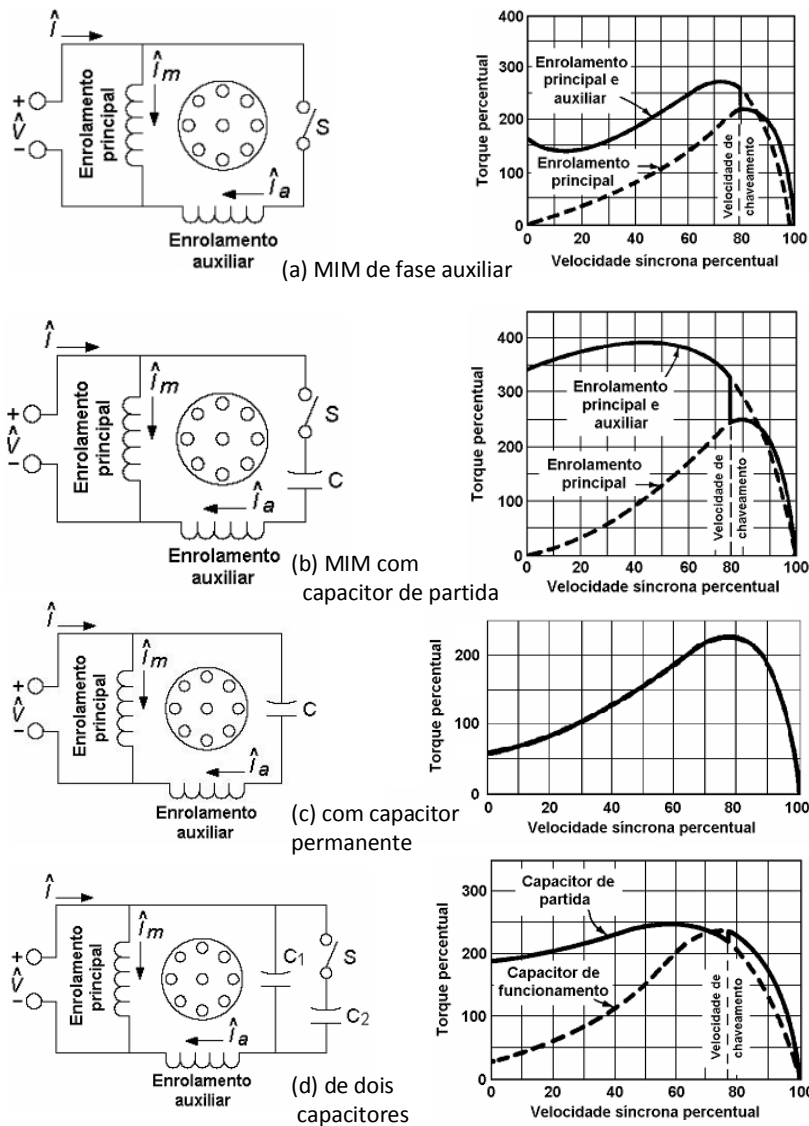
| Aplicação do compressor | Tipo motor | Potência [W] | Velocidade [Hz] | Conjugado partida | Eficiência [%] |
|-------------------------|----------------------------|--------------|-----------------|-------------------|----------------|
| Condicionamento de ar | Fase auxiliar ISR | 94 – 375 | 57,50 28,75 | baixo ou moderado | 50 – 70 |
| | Capacitor partida CST | 94 – 750 | 57,50 28,75 | alto | 60 – 75 |
| | Capacitor dois valores CSR | 94 – 750 | 57,50 28,75 | alto | 35 – 70 |
| Refrigeração | Fase auxiliar ISR | 94 – 375 | 57,50 28,75 | baixo ou moderado | 50 – 70 |
| | Capacitor permanente PSC | 94 – 750 | 57,50 28,75 | baixo | 35 – 70 |
| | Capacitor partida CST | 94 – 750 | 57,50 28,75 | moderado ou alto | 60 – 75 |
| | Capacitor dois valores CSR | 94 – 750 | 57,50 28,75 | alto | 35 – 70 |

Fonte: Adaptado de [31] e [43].

Na figura 11, estão representados de forma sintética os quatro tipos de partida já indicados, onde se pode visualizar o efeito dos capacitores no conjugado. Indica-se a velocidade de chaveamento próxima a 80% da velocidade síncrona (ou 20% do escorregamento), quando se desativa o circuito de partida e o MIM entra em operação contínua na região estável.

O termo “torque” – de uso frequente na indústria e na literatura – empregado na ilustração indicada e em mais outras no decorrer do trabalho, é utilizado para exprimir o “conjugado” do motor, que é o termo normalizado que expressa a grandeza momento de uma força conforme às normas brasileiras ABNT NBR17094:2008 [32].

Figura 11 – Diagramas de MIM de fase dividida e características típicas conjugado-velocidade.



Fonte: Adaptado de [13].

Nota: O termo “torque” usado na ilustração, e no trabalho, é utilizado para exprimir o conjugado do motor.

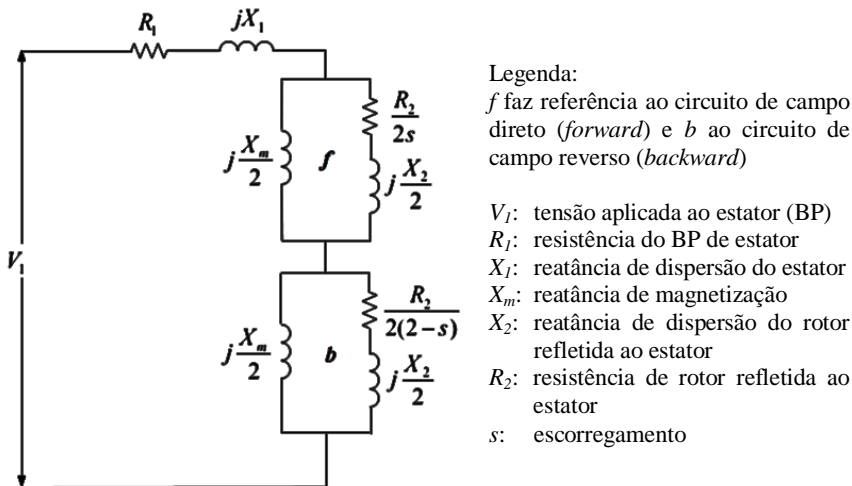
Outros tipos de motores também são bastante aplicados em refrigeração e condicionamento de ar, como, por exemplo, os motores síncronos de ímãs permanentes sem escovas (*brushless*) de corrente alternada (CA) e de corrente contínua (CC). Visando melhorar a eficiência no sistema aplicado, permitem obter economia de energia de até 40%, se comparados aos sistemas convencionais [44]. No entanto, esses tipos de motores não serão abordados neste trabalho.

2.5.4 Modelamento do motor de indução monofásico

A modelagem matemática é utilizada para obter a descrição do comportamento das grandezas internas do motor [38]. Por meio de ensaios específicos e de acordo com dados construtivos são obtidos os parâmetros que regem o modelamento do MIM [41].

Para cada um dos enrolamentos (BP e BA) do MIM, o circuito equivalente pode ser representado como na figura 12.

Figura 12 – Circuito equivalente de campos girantes do MIM para um dos dois enrolamentos de estator conforme a IEEE Std 114-2010.



Fonte: Adaptado de [45].

De acordo com a teoria que descreve o funcionamento do motor, como mencionado na seção 2.5.3 anterior, se tem o circuito equivalente normalmente útil para calcular as perdas e o desempenho do MIM [45].

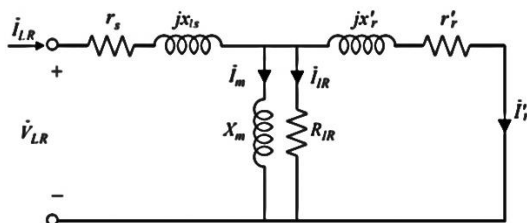
Na literatura de referência e nas normas consultadas, o modelo comum de circuito equivalente usualmente empregado é aquele que se refere à teoria dos campos girantes [11][21][30][38][39][41][45]. Entretanto, também é possível encontrar o procedimento por meio da teoria de campos cruzados em [31] e [41].

O procedimento matemático para obter o modelo elétrico equivalente para o MIM tem sido tratado em vários trabalhos da UFSC [13][21][29][38], em textos e manuais de engenharia [26][30][31][39], e detalhadamente desenvolvido no trabalho de Andersen, 2008 [11], baseado nas publicações de Veinott, 1959 [41] e Morrill, 1929 [40].

O procedimento experimental dos ensaios para a obtenção dos parâmetros do MIM pode ser encontrado de forma coerente e clara no trabalho de Vieira, 2008 [46].

Para o rotor parado, seja no instante de partida ou por meio de bloqueio mecânico, o escorregamento é igual a 1 (100%), e portanto, o circuito equivalente do motor pode ser representado pela figura 13, que também considera perdas constantes no ferro.

Figura 13 – Circuito equivalente simplificado do MIM para rotor bloqueado (*locked rotor - LR*) considerando perdas equivalentes constantes no ferro (R_{IR}).



Legenda:

V_{LR} : tensão de alimentação de estator;
 I_{LR} : corrente de rotor bloqueado (*locked rotor*);
 r_s : resistência de enrolamento de estator;
 x_{ls} : reatância de dispersão do estator;
 I_m : corrente de magnetização;
 X_m : reatância de magnetização;

I_{IR} e R_{IR} : corrente e resistência que representam as perdas no ferro;
 x'_r : reatância de dispersão de rotor refletida ao estator;
 r'_r : resistência da gaiola do rotor refletida ao estator;
 I'_r : corrente de rotor refletida ao estator;

Fonte: Adaptado de [47].

O conjugado de rotor bloqueado é proporcional ao produto de três fatores principais: (1) o seno do ângulo de deslocamento entre as

correntes nos enrolamentos BP e BA, (2) o produto da corrente em BP pela corrente em BA e (3) o número de espiras (voltas) de BA [31].

2.5.5 Tipos de enrolamento de estatores

Existem três tipos básicos de estruturas de enrolamento para estatores de máquinas de indução:

- a) estatores de enrolamento aleatório (*random-wound*);
- b) estatores com enrolamento pré-formado usando bobinas de múltiplas espiras (*formed-wound*);
- c) estatores com enrolamento pré-formado usando barras de Roebel (*partly formed-wound*) para geradores, fora do foco deste trabalho;

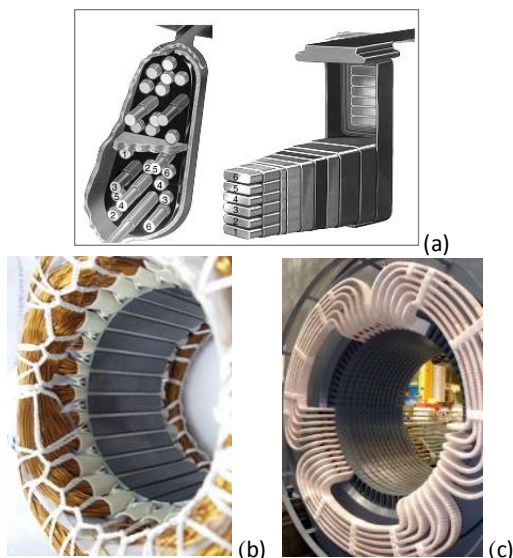
Como se pode perceber pela figura 14, os enrolamentos relacionados têm aspectos construtivos bastante distintos. Os estatores de bobinas pré-formadas são aplicados em tensões mais elevadas, logo, o projeto e execução do enrolamento deve assegurar que existe a menor diferença de potencial possível entre espiras adjacentes de uma mesma bobina. Por outro lado, de acordo com a norma ABNT NBR 5457:1980 [28] e a NBR IEC 60054-411:1996 [48], enrolamento aleatório, é aquele no qual os condutores individuais de um lado de bobina ocupam posições quaisquer na ranhura [28], ou seja, os condutores não seguem uma ordem ou padrão predefinido.

Na figura 14(a) se mostra por meio de números, a sequência em que ficariam dispostas as espiras em parte de uma ranhura de um motor (ou gerador) para enrolamento aleatório e para enrolamento pré-formado. No primeiro, a distribuição aleatória pode fazer com que duas espiras, as mais afastadas eletricamente, fiquem próximas uma junto a outra. No segundo, a distribuição projetada, faz com que o potencial elétrico entre duas espiras subsequentes seja o menor possível.

Em geral, os enrolamentos pré-formados são empregados na construção da maioria de motores e geradores na faixa de 50 MW até 100 MW, e, por outra parte, os enrolamentos aleatórios são usados para máquinas girantes de potências de até algumas centenas de kW [1], onde se enquadram os chamados motores de potência fracionária – com potência fração de 1 HP (750 W) ou 10 HP (7,5 kW) [34].

Motores monofásicos de potência fracionária, na ordem de 1 kW como os usados na maioria dos compressores herméticos de refrigeração, foco deste trabalho, são fabricados com enrolamentos aleatórios.

Figura 14 – Tipos de enrolamentos.



(a) seção de uma ranhura para enrolamento aleatório – à esquerda – e enrolamento pré-formado – à direita; (b) vista de enrolamento aleatório de um MIM; e (c) vista de enrolamento pré-formado.

Fonte: (a) [27], (b) autor e (c) [49].

Na figura 15(a) se ilustra como vão ficando dispostas concentricamente as bobinas no estator em relação ao eixo de enrolamento, e, na figura 15(b), um enrolamento terminado e enlaçado com a bandagem que lhe confere rigidez mecânica à montagem [1].

Figura 15 – Estatores com enrolamento aleatório.

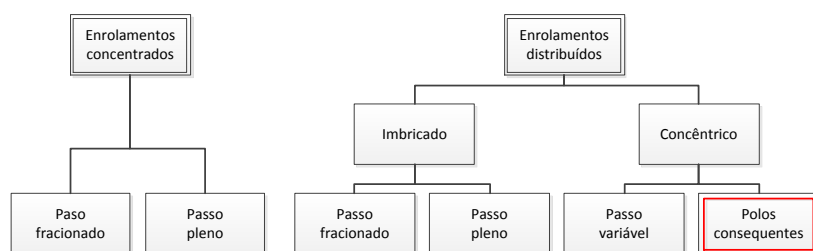


(a) em processo de inserção de bobinas montadas concentricamente e (b) enrolado e enlaçado com bandagem.

Fonte: Adaptado de [27] e [31].

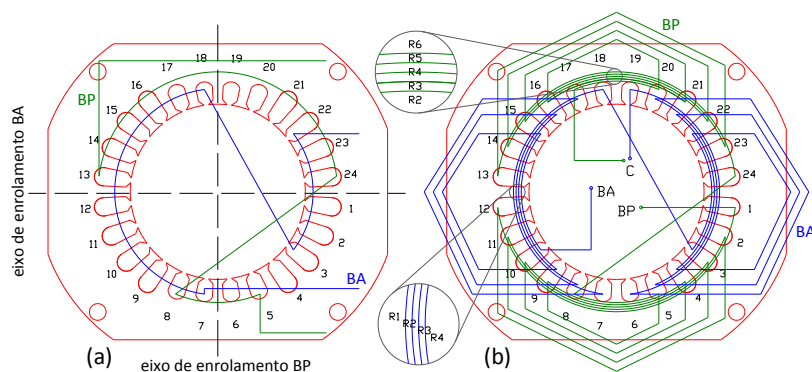
Existem inúmeras possíveis combinações para a construção de enrolamentos em motores elétricos. Na subclassificação da figura 16 apresentada por Giesel [16], os enrolamentos dos MIM, usados em compressores herméticos, se enquadram como enrolamentos distribuídos, concêntricos [29], de polos consequentes, e com distribuição simétrica das bobinas em relação a um eixo de enrolamento, conforme ilustrado na figura 17(a).

Figura 16 – Subclassificação dos enrolamentos quanto ao seu tipo.



Fonte: Adaptado de [16].

Figura 17 – Esquema de enrolamento de um MIM.



(a) Enrolamento das primeiras bobinas de BP e BA e (b) enrolamento completo indicando a disposição dos grupos de bobinas nas ranhuras do estator (R1 a R6).

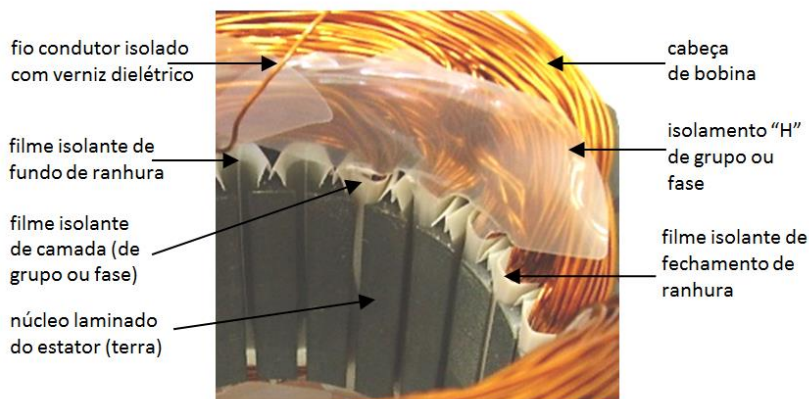
Fonte: Autor.

Normalmente, o enrolamento BP é inserido e conformado primeiro do que o BA, ficando no fundo das ranhuras. A complexa sequência de enrolamento e disposição das bobinas do MIM (figura 17b) vai caracterizar parcialmente o sistema de isolamento do estator.

2.5.6 ISOLAMENTO ELÉTRICO NO ESTATOR

A combinação de materiais isolantes usados nos equipamentos elétricos denomina-se de isolamento elétrico (SIE) [48][50]. Nos motores o sistema de isolamento é composto de vernizes, resinas, bandagens e filmes entre outros [13]. No MIM em particular, o sistema de isolamento completo deve contemplar a isolação dos fios condutores, isolação de fundo de ranhura, isolação de camadas, isolação de fechamento de ranhura, isolação entre fases, isolação do cabo de ligação e isolação das conexões entre os fios. Como ilustrado nas figuras 18 e 19, tal sistema deve garantir isolamento elétrico entre os grupos de bobinas BA e BP, entre o enrolamento e o pacote do núcleo laminado e entre os fios que formam as espiras.

Figura 18 – Secção de estator com enrolamento aleatório, indicando os componentes do sistema de isolamento.

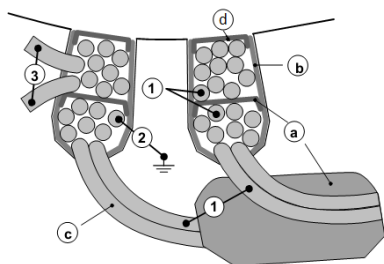


Fonte: Autor.

Isolamento de grupo ou entre fases: em motores de indução, frequentemente se tem bobinas de dois enrolamentos (BA e BP ou duas fases) na mesma ranhura do estator, como também em regiões vizinhas nas cabeças de bobina. O modo de isolamento entre fases mais comum é mediante papeis ou lâminas feitas de materiais sintéticos [1]. Para isolamento entre fases ou grupos, nessas máquinas de baixas tensões, podem ser usadas lâminas finas de poliéster que tem excelentes

propriedades elétricas isolantes e baixo custo [51] ou fitas de materiais a prova de fogo em ambientes classificados como perigosos [1].

Figura 19 – Diagrama de seção do estator com elementos do isolamento.



Legenda:

- a. isolamento de grupo ou entre fases
- b. isolamento de fundo de ranhura
- c. isolamento do fio condutor
- d. isolamento de fechamento de ranhura
- 1. fase a fase (ou grupos BP-BA)
- 2. fase a terra
- 3. espira a espira

Fonte: Adaptado de [52].

Isolamento contra terra: para isolar eletricamente as bobinas em relação ao núcleo laminado, são usualmente empregadas lâminas ou filmes de material orgânico, como o poliéster, ou sintéticos como o nylon, caracterizados por seu baixo peso, fácil manuseio, baixo custo, ótimo rendimento e por sua excelente rigidez dielétrica (na ordem de 300 kV/mm) [1]. Porém, apesar da boa rigidez dielétrica, sua capacidade de suportar elevadas temperaturas (expansão térmica) pode ser baixa, reduzindo a classe térmica do motor, embora os fios condutores para enrolamentos atinjam classes superiores. Assim, para aumentar as temperaturas de serviço do motor em aplicações específicas (classe 180 ou H, classe 220 ou C como indicado na tabela 2), podem-se empregar estruturas feitas com fibras de vidro, filmes de mica, papéis de cerâmica, polímeros de cristal líquido, algodão ou de fibras de aramida entre outros [1].

Isolamento dos fios condutores: Os enrolamentos dos estatores são formados por condutores constituídos de cobre ou alumínio, de seção circular, esmaltados ou vernizados, com isolamento poliamida-imida (Classe 220°C) ou poliéster com cobertura de poliamida-imida. A espessura do esmalte ou verniz eletroisolante é usualmente de 0,05 mm a aproximadamente 0,1 mm [1]. A norma vigente para este tipo de fio no Brasil e no Mercosul é a NM 60317:2006 (Especificações para tipos particulares de fios para enrolamentos), baseada na norma internacional IEC 60317:1990. A norma norte-americana ANSI/NEMA MW 1000-2012 padroniza esses condutores e define-os como “*Magnetic wire*”.

Tabela 2 – Temperaturas ambientais máximas para condições de ensaio e temperatura de referência conhecida e satisfatória de serviço segundo a classe.

| Altitude [m] | Temperatura [°C] | | | | |
|-------------------|-----------------------|---------|---------|---------|---------|
| | Classificação térmica | | | | |
| | 105 (A) | 120 (E) | 130 (B) | 155 (F) | 180 (H) |
| 1000 | 40 | 40 | 40 | 40 | 40 |
| 1500 | 37 | 36 | 36 | 35 | 34 |
| 2000 | 34 | 33 | 32 | 30 | 28 |
| 2500 | 31 | 29 | 28 | 24 | 21 |
| 3000 | 28 | 26 | 24 | 19 | 15 |
| 3500 | 25 | 22 | 20 | 14 | 9 |
| DTA ou DTR | <120 °C | <130 °C | <155 °C | <180 °C | <200 °C |

DTA: Durabilidade térmica avaliada; DTR: Durabilidade térmica relativa [48]

Fonte: Adaptado de [32] e [48].

Nota: Classificação dada conforme normas ABNT NBR 17094-2:2008 e ABNT NBR IEC 60085:2012.

Sendo o motor de indução, uma máquina robusta e de construção simples, sua vida útil, como um todo, depende quase exclusivamente da integridade dos materiais empregados no sistema de isolamento [50]. Ambientes corrosivos, umidade e vibração são alguns fatores que afetam tal sistema, porém, a temperatura de operação é sem dúvida o fator mais crítico [53]. Ultrapassar em 8 ou 10 graus a temperatura nominal da isolamento pode reduzir pela metade sua vida útil, e, por tanto, a vida útil do motor [50][53][54].

Além da temperatura, o efeito da frequência de chaveamento de motores associados a inversores de frequência tipo PWM (*Pulse Width Modulation*), acelera o processo de envelhecimento da maioria de materiais isolantes [55], influenciando na diminuição da vida útil da máquina elétrica [56].

2.6 DEFEITOS EM ENROLAMENTOS POR ISOLAMENTO

Pesquisas mostram que 35% a 45% das causas das falhas nas máquinas de indução são provocadas pelo rompimento do isolamento do estator, sendo a sobrecarga térmica uma das maiores causas do processo de degradação do sistema de isolamento para motores de pequeno porte [13][57].

Embora a máquina assíncrona seja bastante robusta, ela está submetida a vários tipos de estresses, que podem produzir defeitos nos

seus elementos constituintes, capazes de originar problemas ao motor como um todo [57]. Na tabela 3 estão relacionadas algumas das causas de estresse.

Tabela 3 – Tipos de estresse no motor de indução.

| Tipo | Causa | Tipo | Causa |
|------------------|--|-------------------|---|
| Térmicos | envelhecimento sobrecarga ciclagem ventilação espiras em curto transitórios | Mecânicos | vibração de bobinas contato rotor-estator desvios de forma danos nos fios excentricidade e alinhamento (rotor-estator) |
| Elétricos | sobretensão dielétrico tracking (caminhos elétricos) descargas corona transitórios | Ambientais | umidade químico abrasão corpos estranhos (lascas) temperatura/radiação |

Fonte: Adaptado de [13], [54] e [58].

Nota: Estresse é a resposta não especificada de um organismo a qualquer demanda sobre ele, agradável ou não, que resulta em certas alterações bioquímicas. Se associa o termo estresse com uma conotação prejudicial ou perigosa com respeito ao excessivo esforço ou desconforto [59], e, sobre sistemas elétricos ou mecânicos, pode-se interpretar como o fato de submeter um dispositivo a operar a ou além de seus limites especificados ou sob condições de serviço consideradas como extremas, que poderiam resultar em alterações físicas, químicas, elétricas ou mecânicas do sistema.

Os estresses relacionados podem agir sozinhos ou em conjunto provocando perfurações, desgastes, envelhecimento prematuro do isolamento, enfraquecimento dos fios, podendo originar defeitos mais sérios no estator [58], capazes de produzir falha, pane ou dano permanente do motor [1]. Os defeitos podem ocorrer tanto no pacote de lâminas quanto nos enrolamentos [57], sendo usual o curto-circuito, quando se estabelece o contato elétrico indesejado entre dois condutores, e o circuito aberto, quando a condução de corrente é interrompida (por rompimento, isolamento ou desconexão).

De todas, a falha mais comum no isolamento de motores de indução com enrolamento aleatório é o curto-circuito entre espiras [60]. Tal defeito pode comprometer permanentemente o funcionamento do MIM. Os curto-circuitos podem ocorrer entre espiras no BP, entre BP e BA, entre espiras no BA, entre enrolamentos e núcleo laminado e entre enrolamentos e rotor, acontecendo segundo o caso, dentro da ranhura,

no topo das mesmas, na cabeça de bobina, por fios fora da bandagem ou na trajetória do rotor.

A tabela 4 foi montada a partir de dados do processo de fabricação de compressores herméticos, obtidos junto à empresa parceira neste trabalho. Nela estão relacionadas as partes de maior ocorrência de curto-circuito para um determinado modelo de MIM. A alta representatividade dos problemas ligados ao BA, se deve a sua constituição – fios mais finos – e posicionamento – inserido sobre BP com camada superficial próxima ao rotor –.

Tabela 4 – Localização de curto-circuitos em um modelo de MIM.

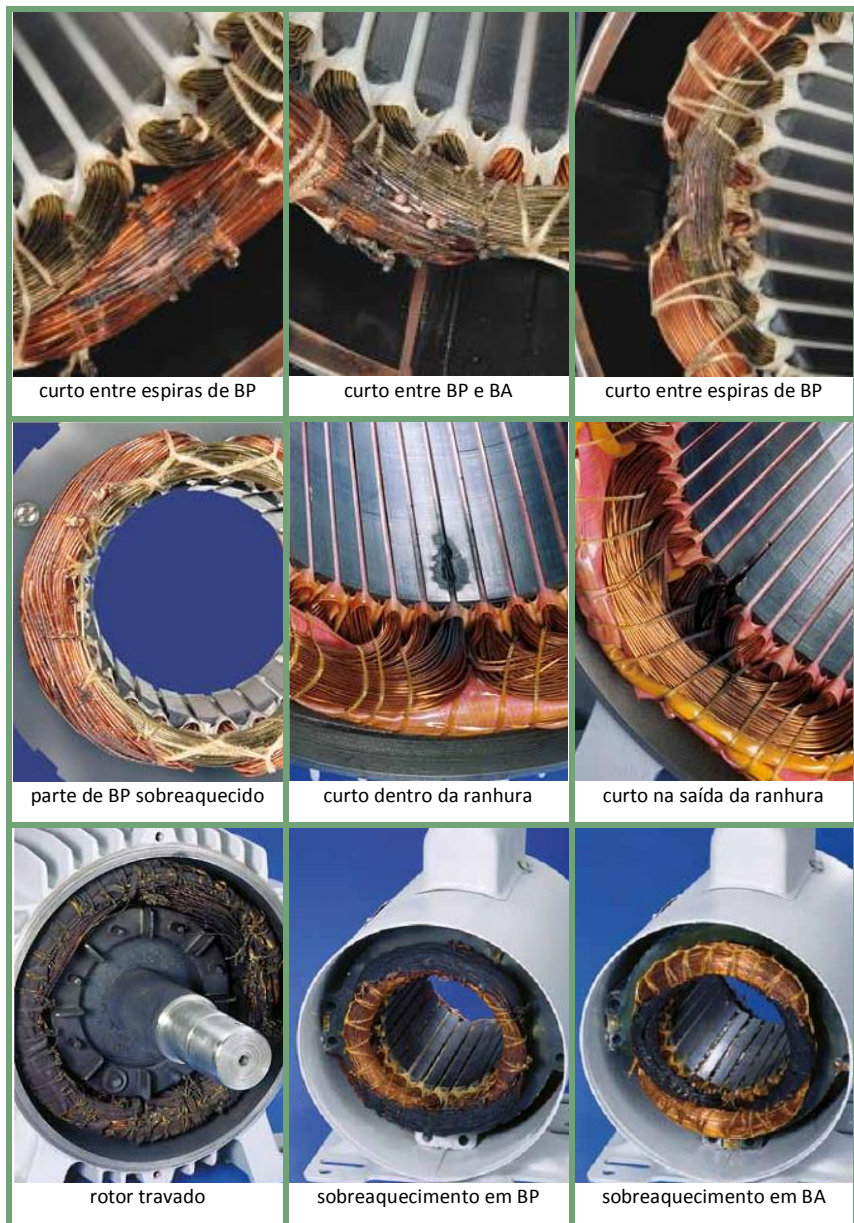
| | BP | BA | Núcleo (pacote) | Rotor |
|---|----|----|-----------------|---------------|
| BP | ● | ○ | ● | ○ |
| BA | ○ | ● | ● | ● |
| Núcleo | ● | ● | | <i>lascas</i> |
| Rotor | ○ | ● | <i>lascas</i> | |
| ○ baixa representatividade ● alta representatividade | | | | |

Fonte: Autor a partir de dados obtidos da empresa parceira.

Mesmo não estando relacionados inicialmente com o sistema de isolamento, alguns defeitos podem evoluir e danificá-lo, como: parte de enrolamento sobreaquecido (em estatores que disponibilizam dois níveis de tensão de alimentação), sobreaquecimento de enrolamento auxiliar por defeitos do mecanismo de partida, sobreaquecimento do enrolamento principal, rotor travado [61], presença de corpos estranhos no entreferro (lascas ou cavacos), defeitos em conectores e terminais, conexão incorreta dos cabos de ligação, excesso de carga e erros de especificação.

Caso ocorra a “queima” do motor, a primeira providência é identificar a causa e o local para evitar novos danos [61]. Alguns defeitos manifestados após operação – depois de ligar o motor à rede de alimentação –, provocam alterações significativas nos isolamentos do estator, visualmente detectáveis, que podem indicar sua origem provável como é apresentado na figura 20.

Figura 20 – Identificação visual de danos em enrolamentos de MIM.

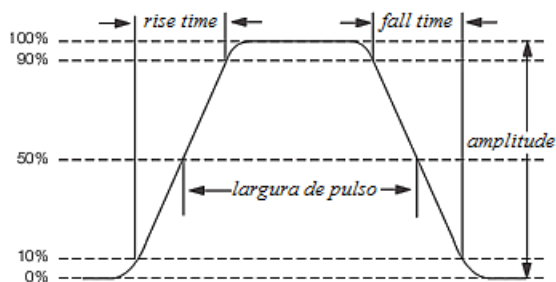


Fonte: Adaptado de [61].

Quando um motor de indução é associado a inversores de frequência tipo PWM, submete-se à frequência de chaveamento do conversor [1], comumente perto de 20 kHz, com milhares de pulsos rápidos de subida por segundo. Esses pulsos repetitivos, com curtos tempos de subida dos ciclos de comutação (figura 21) das chaves semicondutores de potência, têm como consequência a redução da rigidez dielétrica da maioria dos materiais isolantes [55] facilitando a perfuração dielétrica a tensões menores. Além disso, a ação continuada desses pulsos, aliás de acarretar altas tensões nas primeiras espiras dos enrolamentos, leva a danos graduais no sistema de isolamento que podem conduzir a curto-circuito entre espiras [62].

As normas IEC 60034-17:1998 e NEMA MG1-30:1998 estabelecem como *rise-time*, o tempo que um sinal leva para subir de 10% a 90% do valor máximo [63][62], como apresenta a figura 21. No entanto o valor máximo para IEC é o valor pico do transitório, e para NEMA é o valor máximo após se estabilizar. Assim, o valor adotado em conversores de frequência é o NEMA, embora seu valor possa ser menor que o correspondente para IEC [62].

Figura 21 – Definição gráfica para tempo de subida (*rise-time*).



Fonte: Adaptado de [63].

Problemas mecânicos em mancais, excentricidade, balanceamento, desalinhamento, refrigeração do estator, ou ainda, barras abertas no rotor, entre outros [58], são defeitos que podem conduzir a falhas do isolamento, comprometendo a operação contínua e segura do MIM.

Para prevenir falhas no motor, originadas em defeitos de fabricação, se realizam ensaios desde sua etapa inicial de produção, para garantir o seu funcionamento confiável, como será visto na seção seguinte.

2.7 ENSAIOS APLICÁVEIS A MOTORES MONOFÁSICOS

O propósito primordial dos ensaios em motores é garantir a segurança e satisfação do usuário final, atestando que o motor está livre de defeitos elétricos e mecânicos. Por meio de testes chave, pode-se avaliar se o motor atinge o desempenho esperado de uma dada característica, por meio de sua similaridade com um “motor padrão” do mesmo projeto [26].

Na tabela 5 estão relacionados os ensaios tipicamente empregados para determinação das características de desempenho de motores de indução, necessárias para avaliação do estado de conservação e aptidão para funcionamento normal, de acordo com ABNT NBR 5383:2007 [42].

Tabela 5 – Ensaio tipicamente aplicáveis a MIM (estator e rotor acoplados).

| Tipos de motores | Ensaio rotor bloqueado | | Ensaio de partida | | | | Ensaio em carga | | | | |
|-------------------------------|------------------------|-----------|------------------------------|------------------|--------------------------|------------------|-----------------|-------------------|----------|------------|-------------------------|
| | corrente | conjugado | conjugado de rotor bloqueado | conjugado mínimo | conjugado de chaveamento | conjugado máximo | velocidade | fator de potência | corrente | rendimento | elevação de temperatura |
| PSC Capacitor de regime | X | X | X | | | X | X | X | X | X | X |
| CSR Capacitor dois valores | X | X | X | X | X | X | X | X | X | X | X |
| CST Capacitor de partida | X | X | X | X | X | X | X | X | X | X | X |
| ISR Fase auxiliar | X | X | X | X | X | X | X | X | X | X | X |
| Campo distorcido | X | X | X | | | X | X | X | X | X | X |

Fonte: Adaptado de ABNT NBR 5383-2:2007 [42].

Nota: A NBR 5383-2:2007 é baseada na IEEE114:2001.

2.7.1 Classificação de ensaios para motores de indução

Os ensaios de motores elétricos são classificados, de acordo com as normas ABNT NBR 17094-2 [32] e IEC 60034-1 [64], em três grupos, como representado na tabela 6: de rotina, tipo e especiais.

Tabela 6 – Classificação de ensaios para verificação do desempenho de MIM.

| Item | Relação dos ensaios | Classificação do ensaio | | |
|--|---|-------------------------|------|----------|
| | | rotina | tipo | especial |
| 1 | Medição da resistência de isolamento ^(a) | X | X | |
| 2 | Medição da resistência elétrica dos enrolamentos (do enrolamento principal, auxiliar e complementares) ^(a) | X | X | |
| 3 | Dielétrico ^(b) | X | X | |
| 4 | Em vazio (sob tensão nominal) ^(a) para determinação de: 4.1 potência absorvida 4.2 corrente 4.3 sentido de rotação | X | X | |
| 5 | Com rotor bloqueado ^(a) , para determinação de: 5.1 corrente 5.2 conjugado 5.3 potência absorvida | X | X | |
| 6 | Partida ^(a) com levantamento das curvas características conjugado versus velocidade e corrente versus velocidade, para determinação de: 6.1 conjugado de partida , incluindo os valores dos conjugados: rotor bloqueado (Cp), mínimo (Cmin), de chaveamento (Cabr) e máximo (Cmáx) 6.2 corrente de partida | | | X |
| 7 | Temperatura ^(b) | | X | |
| 8 | Determinação do rendimento ^(a) a 100%, 75% e 50% da potência nominal | | X | |
| 9 | Determinação da corrente ^(a) a 100%, 75% e 50% da potência nominal | | X | |
| 10 | Determinação do fator de potência ^(a) a 100%, 75% e 50% da potência nominal | | X | |
| 11 | Determinação da rotação ^(a) a 100%, 75% e 50% da potência nominal | | X | |
| 12 | Determinação do conjugado máximo ^(a) (Cmáx) | | X | |
| 13 | Vibração ^(c) (valor eficaz máximo da velocidade de vibração em milímetros por segundo) | | | X |
| 14 | Nível de ruído a vazio ^(d) (pressão sonora a 1 m de distância) | | | X |
| Nota: (a) Norma ABNT NBR 5383-2 (b) Norma ABNT NBR 17094-2 (seção 11 e 9) (c) Norma ABNT NBR 11390 (d) Norma ABNT NBR 7566 | | | | |

Fonte: Adaptado de [32] .

Os ensaios de rotina são sempre ensaios de fábrica [64], de tipo ou protótipo são feitos para modelos novos, e especiais, para aplicações específicas ou quando demandado pelo cliente. A norma ABNT NBR

5383 [42] orienta a realização dos ensaios definindo os procedimentos a serem seguidos para a execução dos mesmos.

A realização dos ensaios deve garantir a integridade da máquina, não danificar os enrolamentos e não alterar o projeto, dimensionamento e manufatura, tal que o sistema de isolamento fique em condições para as demandas operacionais após aplicá-los. Métodos de diagnóstico adicionais ajudam nesses testes e permitem além, manutenção preditiva durante a vida útil do equipamento [65].

Os ensaios conduzidos para avaliar um sistema ou componente a ou além dos limites especificados são chamados ensaios de estresse [59]. Outros testes específicos (dentre mais de 40 possíveis) podem ser realizados pelo fabricante, desde que definidos em conjunto com o cliente [1][53].

Quando os testes são realizados com o motor energizado em condições nominais de operação ou ainda com carga, chamam-se de ensaios on-line; e, quando feitos sem energizar o motor, com tensão reduzida, ou a componentes dele de forma isolada – com qualquer valor de tensão –, chamam-se de ensaios off-line [1].

2.7.2 Testes off-line de estatores

Segundo Stone [1] e Tallam *et al.* [66], os ensaios que têm demonstrado utilidade para avaliar enrolamentos de estatores em condição off-line após sua fabricação – relacionados na tabela 7 – são:

- a) Resistência de isolamento (RI)
- b) Índice de polarização (IP);
- c) Potencial CC e CA (*hipot*);
- d) Capacitância;
- e) Fator de dissipação de potência ($\text{tg } \delta$);
- f) Fator de potência *tip-up*;
- g) Descargas parciais (DP);
- h) Comparação de surto;
- i) *Blackout* (intensificação de imagem).

Para enrolamentos de motores de até 400 V, os ensaios de surto e de isolamento (resistência ôhmica, *hipot*, RI e IP), são os mais relevantes; os ensaios $\text{tg } \delta$, *tip-up* e DP são tipicamente mais relevantes para enrolamentos de tensões nominais maiores o iguais a 4 kV; os ensaios não-destrutivos mais importantes são os de RI e DP [66]; porém, estudos indicam que os ensaios RI e IP não são uma ferramenta adequada para avaliação [67], embora amplamente empregada [1][66].

Tabela 7 – Testes típicos em enrolamentos de estatores de motores de indução.

| Testes típicos off-line em enrolamentos de estatores | | |
|--|--|--|
| Nome | Descrição | Efetividade de detecção |
| Resistência de isolamento (RI) | Aplica tensão 1 min e mede corrente de fuga | Contaminação ou problemas severos |
| Índice de polarização (IP) | Ensaio de RI que leva de 1 min a 10 min | Contaminação ou problemas severos |
| Potencial CC (<i>hipot</i> CC) | Aplica tensão de CC | Problemas severos |
| Potencial CA (<i>hipot</i> CA) | Aplica tensão de CA | Maior efetividade que CC |
| Capacitância | Mede capacitância contra terra | Moderado para problemas térmicos |
| Fator de dissipação (tg δ) | Mede perdas no isolamento | Moderado para problemas térmicos |
| Fator de potência <i>tip-up</i> | Mede diferença de perdas de isolamento entre alta e baixa tensão | Problemas térmicos ou contaminação em estatores pré-formados |
| Descargas parciais (off-line) | Detecta pulsos de descargas parciais | Maioria de defeitos para estatores pré-formados |
| Comparação de surto | Aplica um sinal de surto de tensão | Problemas de isolamentos entre espiras e bobinas |
| <i>Blackout</i> | Aplica alta tensão e observa descargas em ambiente obscuro | Contaminação e problemas nas cabeças de bobinas |

Fonte: Adaptado de [1].

Em laboratório, para avaliar a qualidade dos materiais ferromagnéticos e as perdas em lâminas do núcleo do estator e rotor do MIM, podem-se considerar também testes como o quadro de Epstein [68][69] ou o teste de fluxo nominal tipo EL-CID [1].

2.7.3 Outros ensaios com rotor acoplado

Além dos procedimentos já mencionados, de acordo com o tamanho do motor e fluxo de produção da empresa fabricante, alguns dos seguintes testes poderiam ser incorporados à rotina de avaliações [26], os quais, além de defeitos de estator, poderiam detectar problemas no rotor:

- Medição do entreferro (*airgap*);
- Balanço de corrente (medição de corrente em cada enrolamento para motores polifásicos);
- Elevação de temperatura de mancais;

- d) Centro magnético em condição sem carga;
- e) Tensão de eixos;
- f) Análise do circuito do motor (MCA – *Motor Circuit Analysis*) [58];
- g) Análise da assinatura de corrente do motor (MCSA – *Motor Current Signature Analysis*) [58].

2.7.4 Testes de estatores no estágio de fabricação

O processo de fabricação de estatores não é isento de erros [70]. Assim, logo após a etapa de bobinagem, conformação e bandagem, faz-se necessário realizar uma série de medições e testes fundamentais para garantir a qualidade e segurança do estator, previamente à montagem do rotor.

Bancadas de testes elétricos para estatores têm importância vital para realização de ensaios com o intuito de detectar defeitos de maneira rápida e confiável nas peças produzidas, seja de forma individual ou por meio de uma combinação de vários testes subsequentes.

Empresas com elevado fluxo de produção de estatores são impulsionadas a submeterem cada unidade produzida a testes mais rápidos, visando avaliação de aspectos imediatos de segurança e operacionalidade [71], além de seguir as recomendações das normas. No entanto, devido ao curto tempo destinado aos testes, nem sempre se consegue acertar o objetivo de detectar todos os defeitos.

Os testes considerados indispensáveis no controle da qualidade no processo de fabricação de estatores são: medição de resistência ôhmica, de resistência de isolamento, de tensão aplicada, de surto e de sentido de rotação [72][73], aplicados comumente nas linhas de fabricação de empresas com elevado fluxo de produção, por estações automatizadas, dedicadas à medição e avaliação de enrolamentos e isolamentos de estatores.

Cada um dos testes pode ser feito de forma independente por equipamentos específicos, chamados de módulos, caracterizados normalmente pela robustez, resistência e capacidade de realizar ensaios de forma precisa no seu campo de atuação. Ainda, se são integrados vários módulos (de prateleira para testes dedicados) em um só rack de testes, fala-se de painel modular, os quais têm uma forte tendência na indústria [71][72]. Apesar disso, empresas com elevado fluxo de produção de estatores continuam realizando a maior parte desses ensaios em painéis integrados, especificamente desenvolvidos para avaliar

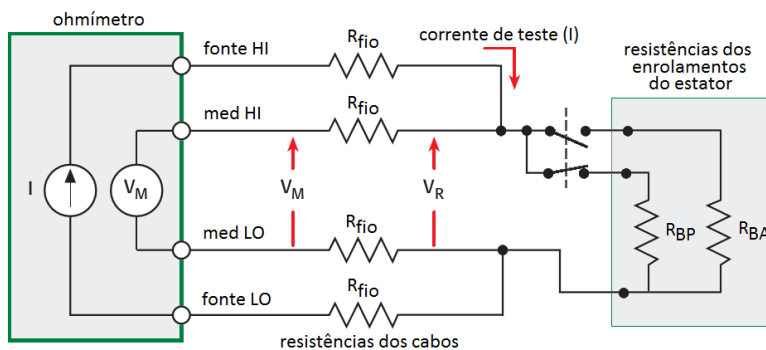
motores elétricos, que se caracterizam por unificar e realizar em uma só bancada, as sequências de testes [71][72][73].

2.7.4.1 Medição de resistência elétrica

A medição da resistência ôhmica dos enrolamentos é indispensável para garantir a qualidade do estator. O valor da resistência é um indicativo do número de espiras efetivo, material e diâmetro dos condutores, e qualidade dos contatos das ligações elétricas. Sua análise compreende a comparação com valores de resistência nominais e com valores das demais fases ou enrolamentos [72]. Defeitos como conexões com alta resistência (mal feitas), conexões abertas e curto-circuitos que apresentem grande variação de resistência, são claramente evidenciadas através de medição da resistência [58].

Embora seja aceitável uma variação de $\pm 5\%$ no valor da resistência dos enrolamentos em um processo produtivo típico da empresa parceira neste trabalho [72], para diminuir as incertezas e eliminar a influência do comprimento dos cabos de medição, emprega-se o método de medição de resistência a quatro fios, como ilustrado na figura 22.

Figura 22 – Medição de resistência a quatro fios no MIM.



Fonte: Adaptado de [74].

2.7.4.2 Teste de resistência de isolamento RI

O teste de resistência de isolamento RI tem por finalidade avaliar a capacidade do isolamento elétrico do enrolamento de se opor à passagem de corrente contínua, examinando a resistência entre os fios condutores e o núcleo laminado (carcaça). Aplica-se um alto valor de tensão contínua V , mede-se, com um amperímetro sensível, a corrente I_t

que circula após o tempo t , e se obtém o valor da resistência de isolamento no tempo t (RI_t), conforme a equação (3).

$$RI_t = \frac{V}{I_t} \quad (3)$$

A resistência de isolamento é proporcional à espessura dos materiais isolantes e inversamente proporcional à área superficial do condutor. Além disso, é diretamente afetada pela condição da superfície de isolamento, umidade, temperatura e nível de tensão aplicada [75].

O ensaio consiste na aplicação de uma tensão CC entre os condutores do motor e a carcaça e avaliação da corrente resultante. Como nesse teste o isolamento é excitado apenas em CC, faz-se necessário algum tempo para que os seus dipolos polarizem. As normas indicam tempo de carga de um minuto [76] para máquinas que operam acima de 2300 V e de um a dez minutos para máquinas maiores que 750 W [75]. Segundo a norma IEEE 114-2010, não é comum a aplicação do teste em MIM novos, mas, se requerido, sugere-se a observação da norma IEEE 43-2000 [45][75] que faz uma extensiva discussão da teoria do teste RI.

O teste de resistência de isolamento RI não deve ser confundido com o teste *hipot* CC, pois a tensão aplicada no teste de RI é menor que o valor de pico da tensão nominal do enrolamento [77], enquanto para o *hipot* CC é normalmente maior. Além disso, o teste RI observa a evolução da resistividade do sistema de isolamento no tempo, enquanto o *hipot* CC tem que ser um teste muito rápido para não danificar o isolamento.

Um aumento considerável de corrente durante o teste, terá como resultado leitura menor do valor de RI_t em relação ao valor esperado, e, conforme o critério de aceitação do fabricante, indicará que algum ponto do sistema de isolamento está comprometido ou danificado.

2.7.4.3 Teste de tensão aplicada (*high-potential* ou *hipot*)

A finalidade do teste de *hipot* é determinar se a capacidade dielétrica do sistema de isolamento é suficiente para garantir a isolamento mínima e se pode suportar estresses elétricos sob condições normais de operação [73][78].

Segundo a natureza da tensão aplicada, esse teste de estresse, pode ser de três tipos: em corrente alternada (CA), em corrente contínua (CC) ou em muito baixa frequência (VLF) – de 0,1 Hz. Assim, para

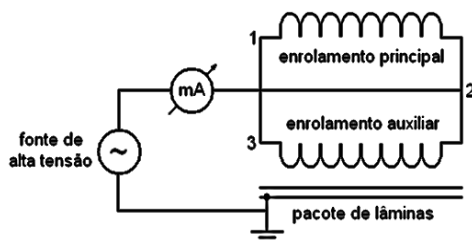
avaliar o sistema isolante dos estatores com enrolamento aleatório, são empregados apenas os dois primeiros [78].

O estator será aceito e considera-se como bom, somente se suportar a tensão de teste durante o tempo especificado. Se o enrolamento não for aprovado é obrigatório o reprocesso, pois o isolamento deve estar comprometido em algum ponto [77].

O teste *hipot* CA (figura 23) consiste em aplicar um alto valor de tensão de CA (U_{hCA}), acima do valor nominal de alimentação ($U_{nominal}$) dos enrolamentos, por um tempo especificado. Conforme a norma IEEE95-2002 – voltada a máquinas de tensões de serviço de 2300 V e superiores – [78], o valor de tensão do teste é calculado a partir da equação (4),

$$U_{hCA} = (2 * U_{nominal} + 1000) . \quad (4)$$

Figura 23 – Ensaio de tensão aplicada *hipot* de CA.



Fonte: [71].

O teste ***hipot* CC** consiste em aplicar um alto valor de tensão CC (U_{hCC}), normalmente não empregado para avaliar estatores com enrolamentos aleatórios e de baixa potência. O valor da tensão *hipot* de teste é obtido a partir de equação (5).

$$U_{hCC} = 1,7 * (2 * U_{nominal} + 1000) \quad (5)$$

Se os níveis de tensão especificados forem ultrapassados, se for excedido o tempo de ensaio ou se forem feitos testes repetidos (acima de cinco), esse ensaio de estresse pode ser considerado destrutivo. No entanto, estudos mostram que quando aplicado corretamente, não altera as características do sistema de isolamento e é considerado seguro [78]

Em geral, o teste de *hipot* em CA é mais revelador que o teste de *hipot* em CC e, por isso, é preferido na indústria [1][78][75].

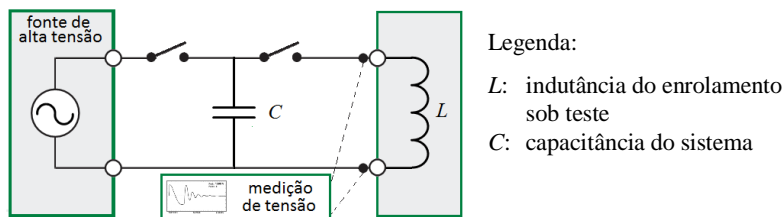
2.7.4.4 Teste de surto elétrico (ou impulso elétrico)

O intuito do teste de surto elétrico é detectar defeitos no isolamento entre espiras dos enrolamentos do motor, por meio da aplicação de um gradiente de tensão elevado para produzir momentaneamente estresse e verificar a capacidade de isolamento [79]. Pode detectar, adicionalmente, desvios do processo de bobinagem, como número de espiras, diâmetro de fio trocado, material de fio trocado, desvios nas características do aço laminado, espessura do isolamento, erros de conexão e, como nos demais ensaios elétricos, problemas característicos de continuidade [70].

O teste de surto identifica a variação das características elétricas relativas a um determinado padrão e, por isso, também é chamado de teste comparativo de impulso elétrico [58]. Assim, no teste de surto, a resposta das bobinas a serem testadas devem apresentar características semelhantes a um padrão para não serem interpretadas como defeituosas.

A configuração básica do teste, como mostrado na figura 24, comporta um circuito tanque ou oscilador LC, onde L expressa a indutância do enrolamento sob teste e C o valor da capacitância do sistema, definida pelo sistema de isolamento, distribuição do enrolamento e valor do capacitor interno do equipamento de teste [70].

Figura 24 – Configuração básica do teste de surto elétrico.



Fonte: Autor.

O teste de surto consiste basicamente em aplicar um pulso de tensão relativamente alto ao circuito de teste, para estimular o sistema cujo sinal de resposta, de tipo senoidal, vai ter uma frequência de oscilação f resultante direta de L e C , relacionadas por meio da equação (6) [79].

$$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (6)$$

Como o valor da capacitância depende quase exclusivamente do capacitor interno, que é constante, então o valor da frequência fica condicionado a qualquer variação na indutância, dada principalmente por características do fio, do número de espiras e das variações no núcleo laminado. Uma ou mais espiras em curto reduzem o valor da indutância do enrolamento e, por consequência, aumentam o valor da frequência do sinal relativo ao padrão de comparação.

Além do valor de frequência de oscilação, a amplitude do sinal de tensão (U) resultante é influenciada pelo valor da indutância, conforme a equação (7),

$$U = L \frac{di}{dt} \quad (7)$$

onde a corrente elétrica (i) varia de acordo com tempo (t).

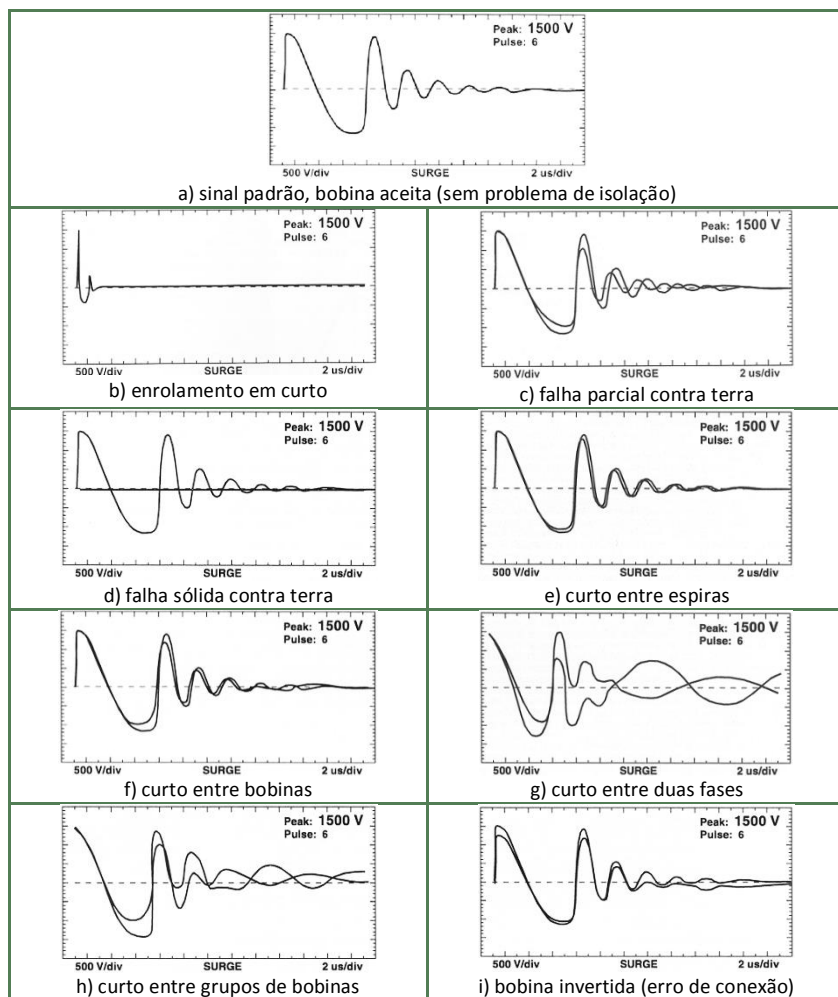
Conforme ilustrado pela figura 25, as alterações das curvas resultantes do teste de surto, que podem ser decorrentes de variações da amplitude do sinal de tensão ou de frequência de oscilação, são indicativos de anomalias no equipamento sob teste, entre elas os defeitos no sistema de isolamento.

Como a “bobina padrão” vai ter um “sinal padrão”, pode-se realizar o julgamento automático do estator sob teste, utilizando métodos de comparação de área e comparação de diferencial de área entre os dois sinais [72].

Como mostrado na figura 26, a detecção de falhas pode ser feita também a partir de outras avaliações, como banda de tolerância de amplitude, frequência de oscilação ou passagem por zero (*zero crossing*) e efeito corona, descritos em [58]. Contudo, as variações na frequência de oscilação e na amplitude do sinal que possibilitam os métodos de análise de comparação de área e de diferencial de área, poder-se-iam compensar comprometendo a confiabilidade do ensaio, portanto, faz-se necessário aplicar mais de um método de avaliação.

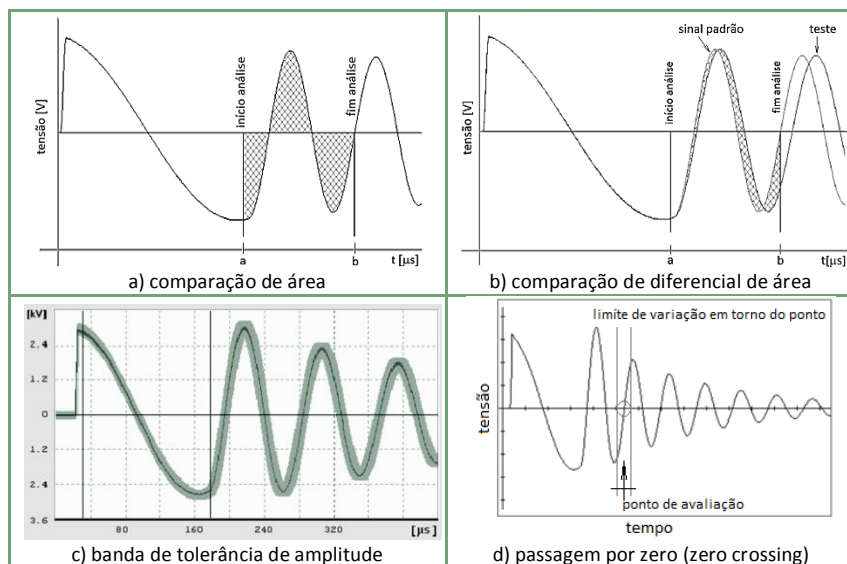
Os limites de aprovação para as diferenças, entre o sinal do padrão previamente configurado e o sinal oriundo da bobina sob teste, são determinados pelos fabricantes [72]. Dependendo do método de avaliação e da sensibilidade do processo de fabricação, as variações aceitáveis na leitura podem chegar até 10%.

Figura 25 – Sinais característicos de testes de surto em estatores de motores de indução com defeitos tipificados.



Fonte: Adaptado de [79].

Figura 26 – Métodos de análise para o teste de surto.



Fonte: a) e b) adaptadas de [72], c) e d) adaptadas de [58].

Na tabela 8 se apresenta resumidamente uma comparação entre os métodos de análise do teste de surto [58], indicados na figura 26.

Tabela 8 – Comparação entre métodos de análise para o teste de surto.

| Método | Tipo de falha detectada | Característica |
|--|---|---|
| Comparação de área | Curto-circuitos entre espiras Erro no número de espiras Variações no circuito magnético | Variação de área sob a curva do sinal |
| Comparação de diferencial de área | Idem ao anterior Conexões mal feitas (contatos) | Variação de área entre as curvas dos sinais |
| Banda de tolerância de amplitude | Isolamento Ligações erradas | Variação na amplitude do sinal |
| Passagem por zero | Isolamento Erro no número de espiras Ligações erradas ou mal feitas | Variação na frequência (período) do sinal |

Fonte: Adaptado de [58].

2.7.4.5 Teste de sentido de rotação

O teste de rotação tem o objetivo de detectar o sentido de giro do campo magnético gerado pelo estator. É realizado sem a necessidade de partes móveis, por meio de transdutores de efeito Hall [70] com o estator energizado em condição de partida (BP e BA ligados).

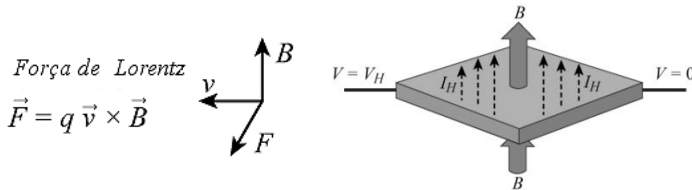
O efeito Hall refere-se à tensão elétrica mensurável que aparece em um material condutor ou semicondutor, quando uma corrente elétrica que circula através dele, é influenciada por um campo magnético [80]. A corrente I e campo magnético B são normais e relacionadas com a tensão hall V_H como indica a equação (8),

$$V_H = \frac{I \cdot B}{\rho_n \cdot q \cdot t} \quad (8)$$

onde ρ_n é a densidade de portadores de carga, q a carga do elétron e t a espessura do fio ou placa condutora.

O princípio subjacente ao efeito Hall é a força de Lorentz, representada na figura 27. Quando um elétron se move em um condutor ao longo de uma direção v , perpendicular a um campo magnético aplicado B , experimenta uma força F , chamada força de Lorentz, normal ao campo aplicado e ao fluxo de corrente.

Figura 27 – Força de Lorentz e Efeito Hall.



Fonte: Adaptado de [80].

A indicação do teste de rotação pode diagnosticar grampeamento incorreto dos terminais das bobinas, desvio que culminaria com mudança no sentido de giro do rotor e comprometimento da funcionalidade do compressor como um todo [70]. Consequentemente, problemas que sejam característicos de continuidade ou desvios na variação do campo, podem ser indicados por meio desse teste [72].

2.7.4.6 Sequência de testes

No estágio de fabricação de estatores de MIM, os testes devem ser realizados automaticamente e de forma subsequente, controlados por um computador. Idealmente, a identificação de algum defeito deveria inviabilizar os ensaios seguintes [73]. Além disso, todos os ajustes de medição, parâmetros medidos e tolerâncias deveriam ficar registrados em um banco de dados e estarem disponíveis para a análise através de ferramentas estatísticas visando o controle e gerenciamento do processo.

Nas linhas de produção de estatores [72] e nos laboratórios de aceitação e aprovação de motores [79], a sequência de testes, normalmente aplicados, são executados na ordem seguinte:

- a) Medição de resistência ôhmica;
- b) Tensão aplicada CA (*Hipot CA*);
- c) Surto elétrico (*Surge test*);
- d) Sentido de rotação do campo (e sequência de fase);

Apesar da grande quantidade de testes aplicáveis a motores de indução, estudos apontam que o melhor resultado na avaliação de curto-circuito entre espiras nos motores de indução de baixa tensão é o teste de surto [58][77]. No entanto, devido ao grande fluxo de produção da empresa fabricante, que demanda rápidos tempos de teste, e junto às variações aceitáveis de fabricação – determinadas pelos limites de aprovação nas linhas de montagem em compromisso de produtividade e qualidade –, a avaliação de peças não conformes pode resultar em erros de inspeção ainda com testes de elevada capacidade de detecção.

2.8 CONSIDERAÇÕES DO CAPÍTULO

Neste capítulo foi apresentado o motor de indução monofásico, sua operação típica, seu sistema de isolamento e os defeitos comuns que podem-se apresentar nos estágios de fabricação e de operação. Também foram indicados alguns dos testes comumente aplicáveis para análise de desempenho e detecção de defeitos principalmente na etapa de produção.

Para reduzir ao máximo o número de peças com defeito que atingem ao cliente, logo após sair da linha de fabricação, é preciso empregar, além dos existentes, outros métodos complementários de teste. Nas linhas de produção de estatores, além dos procedimentos de rotina já citados anteriormente, feitos de forma sequencial conforme visto em 2.7.4.6, poder-se-iam incluir outros testes de verificação,

visando assegurar a qualidade e evitar que peças não conformes, com defeitos ou que possam evoluir em falha, alcancem a linha de pré-montagem, onde rotor e estator são acoplados mecanicamente, e, posteriormente, ao cliente.

Na sequência serão analisados dois testes adicionais, identificados como potencialmente úteis para detecção de defeitos na fabricação de estatores de MIM de baixa tensão: o teste de descargas parciais, utilizado normalmente na indústria para avaliar o estado do isolamento de motores de grande porte e alta tensão [58]; e, o ensaio de rotor bloqueado, tipicamente empregado para a determinação da corrente, do conjugado, e, quando necessário, da potência elétrica consumida [81]. A variação nas respostas obtidas a partir desses testes, em relação ao padrão (estatores considerados bons), poderiam indicar defeitos. O primeiro, para os enrolamentos de estator sob condições particulares de estresse na alimentação, e, o segundo, por meio de um rotor de teste acoplado ao estator, levando-o a uma condição aproximada de operação.

3 DESCARGAS PARCIAIS

Neste capítulo é apresentada a teoria básica das descargas parciais (DP), com o intuito de avaliar sua possível aplicação em testes de rotina, para detecção de defeitos de isolamento em enrolamentos de estatores de baixa tensão, como filtro adicional aos já habitualmente empregados. Assim, a partir da análise da literatura relacionada ao fenômeno das DP, quase sempre voltada aos equipamentos de alta tensão, será avaliada sua aplicabilidade como ferramenta para o controle da qualidade na fabricação de MIM de baixa tensão.

3.1 O CONCEITO DE DESCARGAS PARCIAIS

Descargas parciais (DP), de acordo com a definição dada pela norma IEC60270 [82], “são descargas elétricas localizadas que, de modo parcial, fazem conduzir um isolamento (elétrico) e podem ou não acontecer perto de um condutor” (IEC60270:2001, p. 7, tradução nossa). As DP são, em geral, consequência de esforços elétricos locais nos isolamentos ou na sua superfície e normalmente, aparecem como pulsos de curta duração – muito menores que 1 μ s. Tal fenômeno pode ocorrer em cavidades ou inclusões (pequenas partículas ou contaminação de qualquer material diferente ao isolante) de constante dielétrica diferente da do material que as rodeia. Quando esse material é submetido a um campo elétrico, este se distribui por aquele material, submetendo a cavidade ou inclusão a um gradiente de tensão (dV/dt) superior ao suportável pela mesma [83]. A ação continuada desse fenômeno quando contínuo pode originar pequenas descargas disruptivas no interior da cavidade ou na superfície do isolamento, acarretando a progressiva deterioração do material, com consequente alteração de suas propriedades dielétricas. Eventualmente, a ação continuada das DP pode levar à ruptura elétrica completa do material, ocasionando a falha do isolamento [84][85][86][63].

O guia IEEE1434 [87] dá uma definição um pouco diferente:

Descarga parcial é uma descarga elétrica que somente de forma parcial faz uma ponte no isolamento entre condutores. Tal ionização gasosa transitória ocorre em um sistema de isolamento quando o estresse elétrico excede um valor crítico,

e essa ionização produz descargas parciais. (IEEE1434-2000, p.5, tradução nossa).

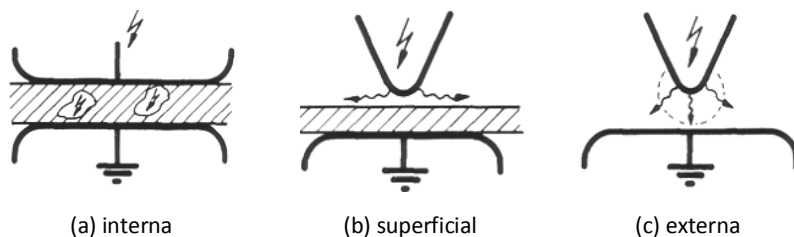
A definição do IEEE, supracitada, permite interpretar, erroneamente, que apenas as descargas por ionização tipo corona são DP. Entretanto, a descarga corona é considerada um tipo particular de DP [1][88][89] devida à ionização do ar, com efeito luminoso visível [59].

As DP são frequentemente sintomas de falha [90], que podem culminar em processo de deterioração do sistema de isolamento de vários tipos de enrolamentos de estatores de motores e geradores [91], além de outras máquinas e equipamentos elétricos.

3.1.1 Tipos de Descargas Parciais

As DP podem ser classificadas em três grupos principais, segundo sua origem, como internas, superficiais ou externas (tipo corona) [51][92]. Tal classificação se deve à ocorrência das DP no interior do material isolante, em cavidades ou inclusões (figura 28a); na superfície do isolamento (figura 28b); ou em torno de pontas agudas e extremidades de eletrodos (figura 28c) [93][94].

Figura 28 – Descargas parciais internas, superficiais e externas.



Fonte: Adaptado de [94].

3.1.1.1 Descargas internas

As DP internas são produzidas em cavidades vazias ou preenchidas com gases, em delaminações ou em rachaduras no interior de isolamentos sólidos. Podem ter sua origem na formação de bolhas ou por contaminação no processo de fabricação da isolamento e, também, por efeito do estresse mecânico ou elétrico sobre o material isolante [95]. Identificam-se também nessa classificação as chamadas descargas de arborescência [93].

3.1.1.2 Descargas superficiais

As DP superficiais são produzidas na superfície dos isolantes onde o campo elétrico tangencial é alto. Ocorrem da borda de um eletrodo até a superfície do dielétrico e podem se manifestar, por exemplo, nas conexões dos cabos nas cabeças das bobinas de estatores, além das que aparecem em bordas condutoras como fonte de descargas corona e que se propagam na superfície de um isolante próximo. São menos concentradas e sua geração demanda maior intensidade de campo elétrico e, em consequência, menos perigosas que as internas, além de menos frequentes [95].

3.1.1.3 Descargas corona

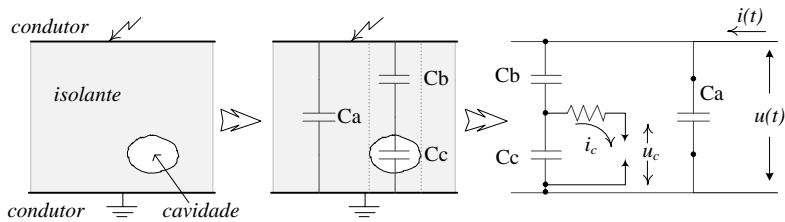
As DP corona acontecem em gases ou líquidos, e são causadas pela forte concentração do campo elétrico em pontas agudas de eletrodos ou ao redor de eletrodos com pequeno raio de curvatura, quando submetidos a altos valores de tensão. Comumente não acontecem nos isolamentos de motores e não teriam efeito em processos de defeitos, além dos que poderiam ser causados pelo ozônio e ácido nítrico gerado, como consequência das DP, que podem deteriorar quimicamente materiais próximos que fiquem expostos [95]. São também conhecidas como descargas externas, quando em matérias isolantes sólidos.

3.1.2 Modelo do fenômeno de DP

O modelo elétrico ABC clássico [96], representado na figura 29, mostra de forma simplificada através de um circuito elétrico equivalente de capacitores, um isolante sólido submetido a DP internas [92][94][97]. Este modelo, comumente usado para modelar o comportamento das DP internas nos isolamentos sólidos, pode incluir adicionalmente um resistor em paralelo a cada capacitor em algumas representações [83][94][98][99][100].

Os três capacitores chamados de A, B e C, que dão nome ao modelo, são também chamados por vezes como Ca, Cb e Cc ou ainda, como C1, C2 e C3 [94]. Cada capacitor no modelo vai representar a capacitância característica de uma parte específica do isolamento. Comumente, como ilustra a figura supracitada, A (Ca) representa a parte do isolamento sem cavidade, B (Cb) a parte em série à cavidade, e C (Cc) a cavidade mesma.

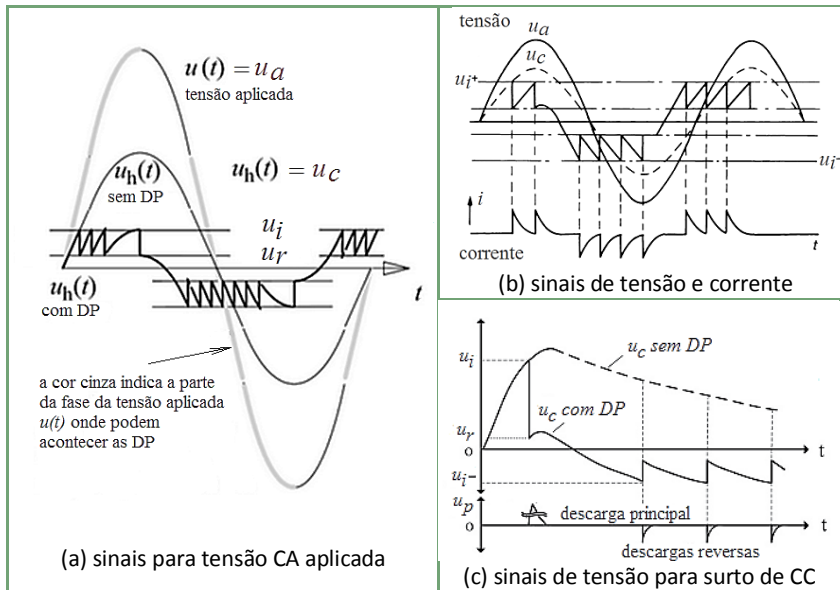
Figura 29 – Modelo ABC das DP internas.



Fonte: Adaptado de [94].

As DP podem se manifestar quando o material isolante com imperfeições é submetido a altas magnitudes de tensão em corrente alternada (CA) [101], ou corrente contínua (CC) [99][102]. Se a magnitude da tensão elétrica na cavidade u_c superar um valor limiar mínimo de início u_i , podem ocorrer as DP (vide figura 30).

Figura 30 – Formas de sinais associadas a DP internas para um isolamento sólido.



Fonte: Adaptado de [101] (a), [83] (b) e [102] (c).

Legenda:

| | |
|---------------|--|
| DP | descarga parcial; |
| $u(t), u_a$ | tensão aplicada; |
| $u_h(t), u_c$ | tensão na cavidade se não acontecer DP; |
| u_i | tensão na cavidade que gera DP; |
| u_{i+} | tensão positiva na cavidade que gera DP; |
| u_{i-} | tensão negativa na cavidade que gera DP; |
| u_r | tensão residual; |
| u_p | amplitude de descarga. |

Conforme as figuras 29 e 30, a tensão de limiar u_i , para que aconteçam DP, depende da magnitude da tensão aplicada $u_a = u(t)$. Assim, u_i está associada a um valor u_a , geralmente na ordem de unidades de kV, para que se inicie o processo de descargas.

Considerando o isolamento como aproximadamente uniforme, Ca representa quase a capacitância total do material, nessa condição Ca é muito maior quanto Cb . Além disso, a capacitância da cavidade Cc é maior que Cb . Pode-se considerar, portanto, Ca maior que Cc [101]. Dessa forma, Ca , Cb e Cc se relacionam conforme a equação (9),

$$Ca > Cc \gg Cb. \quad (9)$$

3.1.3 Grandezas relacionadas às DP

A seguir são apresentadas algumas definições importantes baseadas na norma IEC 60270 [82] e comentadas em [96], empregando o vocabulário da NBR 6940:1981 [89], as quais possibilitam compreensão adequada do fenômeno das DP em materiais isolantes sólidos.

3.1.3.1 Relacionadas à tensão de ensaio

Tensão de ensaio de DP: valor de tensão de CA ou CC especificada para procedimento de ensaio, que, quando aplicada a um isolamento, comumente não é capaz de originar atividade de DP com intensidade superior a determinado limite aceitável.

Tensão de início de DP (*PDIV – Partial discharge inception voltage*): valor de tensão CA a partir do qual acontece atividade repetitiva de pulsos de DP acima de uma grandeza de carga aparente específica, considerando que a tensão aplicada no teste seja gradualmente aumentada a partir de um nível onde não aconteça atividade de DP. Corresponde à expressão “tensão de exploração”, conforme a norma NBR 7294:2010 [103], como a menor tensão a partir

da qual podem ser observadas DP acima de uma intensidade sob condições especificadas.

Tensão de extinção de DP (*PDEV – Partial discharge extinction voltage*): valor de tensão CA para o qual a atividade de pulsos de DP se extingue, considerando que a tensão seja gradualmente diminuída de um valor onde aconteça atividade de DP de um valor específico. Teoricamente, o valor da *PDEV* corresponde, de maneira aproximada, à metade da magnitude da *PDIV* [101].

3.1.3.2 Relacionadas à ocorrência de DP

Carga aparente (*q*): a carga aparente de um pulso de DP é o valor absoluto de carga que, se injetada instantaneamente entre os terminais do objeto sob ensaio, em um circuito de teste específico, produziria a mesma resposta, em tensão ou corrente, que seria produzida por uma DP (citado pelas normas NBR6940 [89], IEC60270[82] e IEEE1434[87]). Ela representa apenas de forma aproximada a carga real transferida pela cavidade do isolamento, a qual não pode ser medida de forma direta [89][104], pois são considerados apenas os efeitos puramente capacitivos. O número “aparente” de elétrons que foi envolvido em cada descarga é medido em picocoulomb (pC) [77]. Tal valor corresponde à carga induzida no circuito externo de medição pelo evento de DP no isolamento [90], mas não especificamente na cavidade. Essa medição é útil para avaliar a condição de isolamento material [104].

Os valores da carga aparente *q* e das tensões *PDIV* e *PDEV* são considerados os mensurandos básicos das DP [89].

Taxa de repetição (*n*): razão entre o número total de pulsos de DP (N_x) e um intervalo de tempo de referência (T_0) [96], conforme a equação (10),

$$n = N_x / T_0 . \quad (10)$$

Os resultados de *n* podem ser expressidos na forma de curvas de distribuição de frequências acumuladas [89].

Frequência de repetição de pulsos (*N*): é o quociente entre o número total de pulsos calibrados de DP (N_y), equidistantes, e um intervalo de tempo de referência (T_r) [96], conforme a equação (11),

$$N = N_y / T_r . \quad (11)$$

É referido também às vezes como frequência de impulso, com $T_r=1$ s [104].

Ângulo de fase (Φ_i): expressa em graus a relação entre a diferença de tempo (Δt_i), do instante em que acontece a transição do cruzamento por zero de negativo a positivo do sinal de tensão CA e o tempo em que se produz o pulso de DP, e o período de um ciclo da tensão de alimentação (T_c), como expressa a equação (12) [82],

$$\Phi_i = (360^\circ) \cdot \Delta t_i / T_c . \quad (12)$$

Corrente média de descarga (I): expressa a razão acumulada dos valores absolutos de carga aparente, de pulsos de DP subsequentes, e um intervalo de tempo de referência (T_r) [89], de acordo com a equação (13),

$$I = \frac{1}{T_r} (|q_1| + |q_2| + \dots + |q_i|) . \quad (13)$$

O valor da corrente média de descarga se expressa em coulomb por segundo (C/s) ou em ampere (A).

Potência média de descarga (P): expressada em watts por unidade de tempo, é o quociente entre a potência, acumulada de uma sequência de pulsos instantâneos de DP devido à grandeza das cargas aparentes individuais (q_i) geradas nos terminais do objeto sob ensaio, e um intervalo de tempo de referência (T_r) [82][89], conforme a equação (14),

$$P = \frac{1}{T_r} (q_1 \cdot u_1 + q_2 \cdot u_2 + \dots + q_i \cdot u_i) , \quad (14)$$

onde u_1, u_2, \dots, u_i são os valores instantâneos de tensão CA aplicada ao ensaio, associados aos instantes em que ocorrem os pulsos de DP individuais t_1, t_2, \dots, t_i , com carga aparente q_1, q_2, \dots, q_i .

Do ponto de vista físico, a potência de descarga parece mais informativa que a carga aparente, em se tratando da avaliação da severidade de uma DP. No entanto, se deve tomar cuidado, pois medição da potência de descarga com precisão aceitável requer faixa dinâmica extremamente alta, pois pulsos de DP com grandeza baixa de carga aparente, mas alta taxa de repetição de pulsos, pode indicar uma potência de descarga similar a pulsos de muito alta carga, aparente mas de baixa

taxa de repetição (LEMKE, 2008, p.17, tradução nossa) [96].

Na prática pode-se precisar a medição de valores de carga aparente entre 10 pC e 10000 pC com taxas de repetição na faixa entre 100 Hz e 100 kHz, fazendo com que alguns instrumentos de detecção de DP comerciais forneçam leituras com altas incertezas de medição [96] (além do 10% considerado pela norma IEC60270 [82], logo após calibrado o sistema de medição).

Taxa quadrática (D): é a relação do valor acumulado dos quadrados de carga aparente de pulsos consecutivos de DP e um determinado intervalo de tempo (T_r), como expressado na equação . (15), com unidades de coulomb ao quadrado por segundo (C^2/s) [82][89],

$$D = \frac{1}{T_r} (q_1^2 + q_2^2 + \dots + q_i^2). \quad (15)$$

As incertezas podem ser afetadas pela dinâmica do processo de medição, como no caso anterior da potência de descarga [96], resultando em valores inexpressivos.

A qualidade dos resultados dos ensaios de DP, normalmente destinados a equipamentos de alta tensão, baseia-se na confiabilidade das medições da carga aparente e das grandezas de tensão de início e de extinção das DP, principalmente [96].

3.1.4 Mecanismo da ocorrência de DP

Para ocorrer uma DP em uma cavidade preenchida com gás, duas condições devem ser satisfeitas. Uma condição necessária, mas não suficiente, é que o campo elétrico no interior da cavidade seja superior ao campo mínimo de ruptura elétrica (E_r), determinando assim o campo de início de ocorrência das descargas (E_i) e, além disso, para um chamado campo de extinção (E_e), menor que E_i , a atividade da DP cessa [51]. A segunda condição é que deve existir pelo menos um elétron livre disponível para dar início ao processo de descarga [88][99].

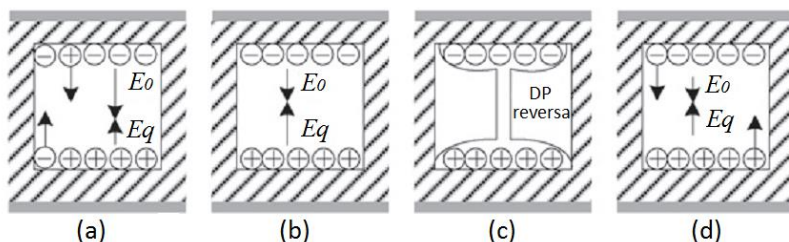
Os valores dos campos E_i e E_e dependem de diversos fatores, dentre eles: as propriedades do gás (permissividade elétrica ϵ_r , menor que a do sólido; pressão, que pode ser muita baixa; e temperatura); a forma e tamanho da cavidade; e o mecanismo específico de descarga. Os valores dos campos E_i e E_e podem ser relacionados com a tensão elétrica

de início u_i , e de extinção u_e das DP, considerando a geometria, a localização da cavidade e a presença de cargas superficiais [51][104].

Na figura 31 está representado o mecanismo físico da DP no interior de uma cavidade do isolamento sólido entre duas placas condutoras, as quais estabelecem um campo elétrico E no material isolante, por meio de uma diferença de potencial u_a (CA ou de CC), como observado na figura 30.

Quando a tensão na cavidade excede o valor de início de descarga u_i durante a fase de subida do potencial aplicado, acontece uma descarga principal na cavidade, com cargas positivas e negativas movimentando-se em sentido oposto ao campo aplicado E , como apresentado na figura 31(a). Durante a descarga principal, a tensão na cavidade cai rapidamente até um pequeno valor residual u_r (figura 30), o qual se deve à finitude dos valores de condutividade pela deposição de cargas.

Figura 31 – Representação do mecanismo de DP numa cavidade de isolamento.



Fonte: Adaptado de [102].

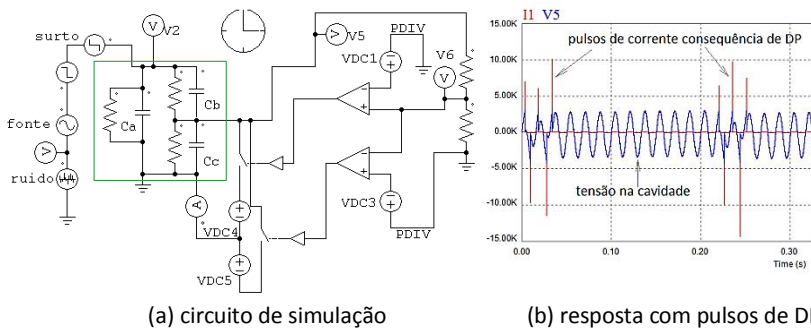
A figura 31(b) representa o campo E_q estabelecido na cavidade que faz diminuir sua tensão até um valor de extinção u_e , a partir do qual cessa a descarga. A DP principal pode reiniciar quando a tensão na cavidade exceder novamente a tensão de início u_i desde que a tensão aplicada continue a subir. Portanto, a descarga na cavidade e subsequente deposição de carga na superfície da cavidade, pode acontecer intermitentemente no ciclo de subida da tensão aplicada [94][99][101][102].

Quando a magnitude da tensão aplicada começa a diminuir, logo após atingir o pico, o potencial na cavidade começa a aumentar em sentido oposto até que acontece uma descarga reversa – figura 31(c) –. A tensão inversa de início de descarga ($-u_i$) tem aproximadamente o mesmo valor em CA e CC. Durante a descarga reversa a tensão na cavidade colapsa de novo, e então, tem comportamento definido pela

tensão aplicada, assim como descrito para o ciclo de subida. Essa sequência vai continuar até que a tensão aplicada diminua até zero, reiniciando-se o processo no ciclo seguinte – figura 31(d) [102].

Um surto de tensão em um sinal CA menor que $PDIV$, mas que leve a ultrapassar u_i na cavidade, poderia dar início a uma sequência de DP. Por meio de simulação do modelo ABC para DP internas em um isolamento sólido, pode-se observar o comportamento teórico da cavidade submetida a uma tensão elétrica senoidal. Por meio do circuito da figura 32(a) com $V_{\text{fonte}}=3,1$ kV, foi simulado um surto capaz de iniciar atividade de DP. Na figura 32(b) são apresentados os sinais estimados para a cavidade no isolamento (C_c), onde se visualiza o efeito das descargas na corrente medível externamente e a tensão que experimentaria a cavidade.

Figura 32 – Circuito de simulação de surto na alimentação que produz DP no modelo ABC.



Fonte: Autor.

Os efeitos da atividade das DP se revelam no material mesmo ou no seu entorno, como alterações, fortes ou sutis, que possibilitam sua detecção e medição. Na seção a seguir são abordados, de forma sucinta, os fenômenos que envolvem as DP e alguns métodos para avaliar a sua intensidade.

3.2 DETECÇÃO E MEDIÇÃO DE DESCARGAS PARCIAIS

A obtenção de sinais característicos de DP pode ser realizada por grande variedade de instrumentos, cada qual registrando grandezas de interesse seguindo certos critérios de comparação de medições, sensibilidade, supressão de ruídos, calibração e localização [105].

O ensaio de descargas parciais é um teste comparativo [77], útil para determinar qual enrolamento (ou objeto) possui maior atividade de DP e, portanto, qual é sujeito a maior degradação. A comparação entre várias máquinas similares permite determinar qual tem maior índice de DP. Além disso, pode-se também comparar as DP de um mesmo estator (ou isolamento) ao longo do tempo, para obter a tendência do seu comportamento [77].

As DP que ocorrem em um isolamento, para algumas condições dadas, podem ser descritas por diferentes grandezas, dentre elas: carga; energia; taxa de repetição [89]. Os resultados de medições expressos em termos de uma ou mais dessas grandezas, empregados para determinar as características e avaliar o estado de isolamentos, são, principalmente, a carga aparente q , a taxa de repetição, a tensão de início ($PDIV$), a tensão de extinção ($PDEV$), corrente e tensão do pulso.

Os métodos que podem ser utilizados para detecção das DP variam conforme o fenômeno de interesse manifestado. Para a maioria dos métodos, a carga aparente é usualmente o mensurando mais empregado para quantificar a atividade das DP [90].

3.2.1 Métodos de detecção

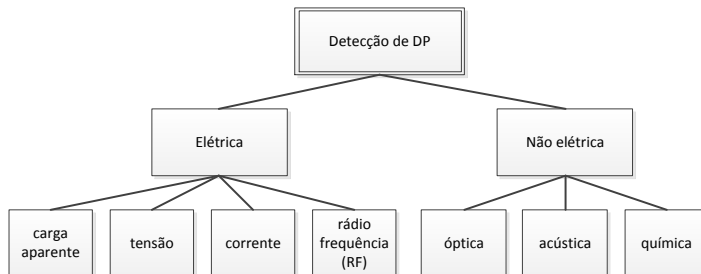
As descargas parciais (DP) dão origem a uma série de fenômenos físicos e químicos, baseados no intercâmbio de energia que acontece no processo da descarga, os quais podem ser usados para detecção e medição de sua atividade. Tais fenômenos podem se manifestar como pulsos de corrente elétrica, perdas dielétricas, radiação eletromagnética (luz, calor), ruído acústico, aumento de pressão em gases, e reações químicas [83][99]. O efeito desses fenômenos indicará qual o comportamento da DP no isolamento.

Para normatizar os métodos de medição acústicos e eletromagnéticos de DP, está sendo elaborada a norma IEC 62478. Adicionalmente, esta sendo desenvolvida a IEEE PC37.301/D5 R1, destinada às técnicas de medição de DP acima de 1000 V, adotando, de forma geral, a IEC 60270.

Conforme ao Vocabulário Internacional de Metrologia (VIM 2012) [106], natureza duma grandeza é o aspecto comum a grandezas mutuamente comparáveis. Para as DP essas grandezas, de natureza elétrica, correspondem aos efeitos de carga, tensão, corrente ou energia [97]. Outras fora desse contexto, consideram-se de natureza não elétrica. Como ilustrado na figura 33, as técnicas para detecção e medição das

DP, baseadas nos fenômenos associados ao processo de descarga, podem ser classificadas, em geral, conforme à natureza da grandeza a medir, em métodos elétricos e não elétricos [82][104][107].

Figura 33 – Tipos de medições em descargas parciais.



Fonte: Adaptado de [82] e [107].

A grandeza associada a uma quantidade de pulsos de DP pode variar estocasticamente, ainda, em ciclos sucessivos e apresentar um aumento ou diminuição com o tempo de aplicação da tensão [82], correspondendo à natureza randômica inerente do processo de ignição das DP [88][99], discutido em detalhe na revisão feita por Van Brunt [108]. As especificações da grandeza da DP, o procedimento do teste e a instrumentação devem ser definidos apropriadamente por um comitê especializado [82], o qual deve discutir os demais aspectos técnicos próprios do procedimento [105].

Em relação às medições de tipo elétrico:

[...] as detecções não elétricas não fornecem medidas quantitativas satisfatórias e são frequentemente usadas apenas para complementar a detecção elétrica, por exemplo, localizando onde ocorreram as descargas no equipamento (DINIZ, 2005, p.5) [109].

Os valores de pico das grandezas das DP são considerados as principais medições nos ensaios de descargas parciais [58]. Isso quer dizer que o fenômeno comumente é quantificado de acordo ao valor máximo (de pico) da grandeza a avaliar, conforme sua própria natureza. Contudo, o processo da DP não só se limita aos seus valores máximos com taxas de repetição específicas, pois seus efeitos são, com certeza, o resultado de todas as descargas e todos os pulsos [83].

Em geral, a magnitude do pulso é proporcional ao tamanho da cavidade onde aconteceu a DP e, conseqüentemente, quanto maior for o pulso, maior será a falha que originou a descarga [58].

3.2.1.1 Detecção não elétrica de DP: acústica, óptica e química

Acústica: uma DP libera energia, em parte, como ruído acústico. Quando uma DP acontece na superfície de um enrolamento, elétrons de alta velocidade e íons se movimentam, através do ar, criando uma onda de pressão acústica em versão minúscula do trovão de um raio [1]. A faixa de frequência do ruído acústico produzido compreende desde algumas centenas de hertz até mais de 150 kHz, com a maior parte da energia acústica liberada na faixa de 40 kHz [87].

Os métodos para detectar DP por meio de emissão acústica são menos susceptíveis a interferência eletromagnética (EMI – *Electromagnetic Interference*) associada à alta tensão, e, comumente, os custos dos circuitos para condicionamento de sinais são menores em relação a outros métodos; porém, são influenciados por vibrações mecânicas [110]. Para detecção de DP, são usados, normalmente, microfones ou sensores acústicos piezoelétricos, os quais convertem a onda de propagação detectada, na faixa de 40 kHz, em um sinal de tensão proporcional [1][82]. Reflexão, refração e absorção, além de outras características do meio, influenciam na propagação do som e têm que ser consideradas durante a detecção e interpretação dos sinais [107]. Sensores ressonantes acústicos, sintonizados na faixa de 150 kHz, também têm sido avaliados para detecção de DP [110].

Óptica: neste caso é considerado o espectro da luz emitida pelas descargas parciais superficiais ou corona, na faixa ultravioleta, visível e infravermelha, dependendo das características do meio [107]. Para o ar, por exemplo, a radiação de luz emitida está dominada pelo espectro do nitrogênio, com 90% da emissão de energia na faixa ultravioleta, entre 250 e 400 nanômetros [107].

As avaliações são normalmente conduzidas em salas escuras ou em condições de luz reduzida, por meio de fotomultiplicadores, binoculares de grande abertura, fotografias de exposição prolongada, intensificadores de imagem, equipamento de detecção ultravioleta ou pela observação de marcas deixadas pelas DP, facilitada às vezes, por meio pela proximidade de lâmpadas de luz ultravioleta [3][82][87][89].

Em estatores de motores, o ensaio é feito para cada um dos enrolamentos de forma separada deixando os demais aterrados, com aplicação de tensão nominal por pelo menos 15 minutos, permitindo a estabilização da atividade de DP [1].

Alternativamente, podem-se usar cabos de fibras ópticas ou cabos fluorescentes de fibra óptica. Assim, a informação que acompanha a emissão de luz pode indicar o nível de energia da descarga e sua localização na superfície do material a avaliar [107].

Química: as DP favorecem reações químicas que podem decompor os materiais da isolamento, como óleos ou isolantes orgânicos. Se acontecerem no ar, podem produzir ozônio [107]. Deste modo, por meio de análise química (por exemplo, análise de gases dissolvidos em óleo isolante, em transformadores, e produção de ozônio) é possível obter informação da energia e atividade das descargas para monitorá-las e quantificá-las. Entretanto, alguns fatores podem diminuir a eficácia do método; por exemplo, umidade, temperatura e fluxo de ar influenciam na concentração de ozônio produzido pela ação das DP superficiais [87].

3.2.1.2 Detecção elétrica de DP: rádio interferência

Os pulsos de corrente no interior ou na superfície dos isolamentos, devidos às DP, criam distúrbios no espectro eletromagnético que, quando repetitivos, geram ondas que podem ser medidas como tensões de rádio interferência (*RIV – radio influence voltage*) na área de influência, normalmente detectáveis como pequenas variações de tensão, na ordem de microvolts [111].

A norma IEC 60270 [82] estabelece que, os medidores de rádio interferência (*radio disturbance meter*) são instrumentos projetados para medirem tensões, correntes e campos de perturbações de rádio, em uma ampla faixa de frequência, baseado nos diferentes tratamentos da quantidade de entrada, na banda de 150 kHz até 30 MHz (banda B). Muito embora os sistemas de medição de *RIV* sejam úteis para detecção das DP, a norma também indica, explicitamente no capítulo 4, que eles não são qualificados para medição da carga aparente.

Os pulsos de DP em sistemas de isolamento baseados em polímeros têm duração de alguns nanossegundos, produzindo radiação de ondas eletromagnéticas de alta frequência (HF – do inglês *High Frequency*). Uma transformação desses sinais no domínio da frequência mostra que o espectro é constante até algumas centenas de megahertz [107]. Assim, as radiofrequências geradas pelas DP, na faixa de 100 kHz até centenas de megahertz, procedentes de máquinas elétricas em serviço ou durante ensaios off-line, poderiam ser detectadas por rádios receptores de AM com antenas apropriadas [87].

3.2.1.3 Detecção elétrica de DP: corrente, tensão e carga aparente

Os métodos de detecção elétrica estão baseados no aparecimento de pulsos de tensão ou corrente de DP nos terminais de um determinado objeto, que pode ser tanto um isolamento elétrico simples quanto um equipamento de alta tensão submetido a teste [83].

Quando ultrapassada a tensão mínima de descarga *PDIV*, a carga elétrica acumulada no processo da DP, em uma cavidade ou na superfície de um isolamento sólido, é liberada na forma de corrente elétrica. Como não há acesso direto à cavidade, o pulso de corrente ou tensão, mensurável externamente, caracteriza a “carga aparente”.

A norma IEC 60270 [82] recomenda que os ensaios para avaliação de descargas parciais utilizem “a carga aparente como a grandeza a medir, sempre que possível, mas outras grandezas podem ser usadas em situações particulares específicas” (IEC 60270, 2012, p. 12, tradução nossa).

Apesar do picocoulomb (pC) ser a unidade mais amplamente utilizada para quantificar as DP, grandezas convencionais como tensão, corrente e pressão acústica, em escalas de milivolt, microvolt, miliampere e decibel respectivamente, são também empregadas, referidas a algum nível arbitrário, para avaliar a grandeza das DP em aplicações de máquinas rotacionais [90].

A medição da carga aparente, em unidades de pC, não é um indicador da severidade de deterioração do sistema de isolamento de um enrolamento completo do estator, fato pelo qual são feitas também medições das grandezas de tensão e corrente, em níveis de milivolt ou miliampere, que dependem porém, da capacitância do objeto sob teste e da constante de tempo do sistema de detecção das DP [1][90].

A calibração em unidades de carga aparente é extremamente difícil para medição de DP em frequências altas e, por isso, também se medem as grandezas associadas às DP em outras unidades relativas [88].

Quando os pulsos de DP são captados por meio de transdutores baseados em transformadores de corrente de alta frequência, com núcleo de ferrite (HFCT – do inglês *High Frequency Current Transformer*), e visualizados na tela de um osciloscópio, a unidade base usada é o miliampere (mA). Para medições de corrente em altas frequências, também podem ser empregados transdutores do tipo bobina de Rogowski [95][112].

A bobina de Rogowski pode ser utilizada para medir pulsos rápidos de corrente ou corrente CA. Tem seu princípio de funcionamento baseado na aplicação das Leis de Ampère e de Faraday-

Lenz, onde a variação do fluxo, devido à corrente elétrica, resulta em tensão induzida na saída [44][113].

Adicionalmente, o milivolt (mV) é útil para comparar grandezas das DP medidas diretamente em um osciloscópio ou analisador eletrônico de magnitude de pulso (PMA – do inglês *electronic Pulse Magnitude Analyzer*). Em geral, um PMA conta o número de pulsos de DP para cada faixa de magnitude de tensão [77].

3.2.2 Medição da carga aparente

A carga real q_c na cavidade do isolamento, representada pela equação (16),

$$q_c = Cc \cdot u_c(t), \quad (16)$$

onde Cc é a capacitância característica da cavidade e u_c a tensão nela, não pode ser medida diretamente. Os capacitores Cb e Cc formam um divisor de tensão, conforme observado na figura 29 (pág. 78). A queda de tensão em Cc pode ser calculada segundo a equação (17),

$$u_c(t) = u(t) \cdot \frac{Cb}{Cb+Cc}, \quad (17)$$

onde $u(t)=u_a$ é a tensão aplicada. A tensão u_a alcança a tensão $PDIV$ quando impõe o valor da tensão de ignição u_i na cavidade, de onde resulta a relação (18),

$$PDIV = u_i \cdot \frac{Cb+Cc}{Cb}. \quad (18)$$

Adicionalmente, a tensão Δu_a se relaciona com a variação de tensão na cavidade u_c , por meio do divisor de tensão formado por Ca e Cb , conforme representado pela equação (19),

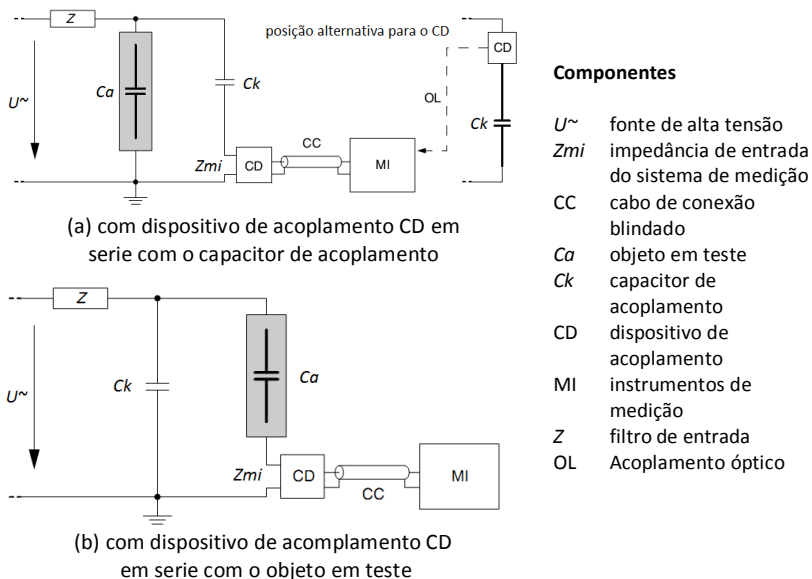
$$\Delta u_a = \Delta u_c \cdot \frac{Cb}{Ca+Cb}. \quad (19)$$

“Duas técnicas têm sido amplamente utilizadas para medida e análise de descargas parciais: (i) medida de descargas parciais com resolução temporal e (ii) medida de padrões de descarga parcial com resolução em ângulo de fase [...]” (SILVA, 2005, p.37) [51].

3.2.2.1 Circuitos de teste e medição de carga aparente de DP

A figura 34 mostra os circuitos básicos usados para estimar a carga aparente, segundo a norma IEC60270. A maioria dos sistemas atuais para a detecção e medição de DP é derivada desses circuitos [82].

Figura 34 – Circuitos básicos de teste de DP de detecção direta conforme a norma IEC60270.

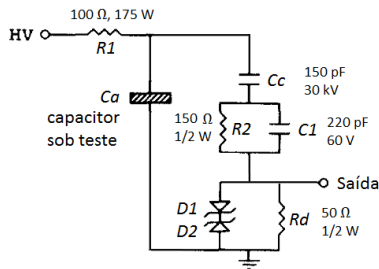


Fonte: Adaptado da IEC60270 [82] *apud* [83].

Todos os componentes dos circuitos de teste devem ser isentos de DP aos níveis da tensão especificada, caso o sistema de medida não seja capaz de discriminá-las das que provêm do objeto em teste [83]. O capacitor de acoplamento C_k deve ser de baixa indutância e a fonte de alta tensão de baixo ruído de fundo, assim como todos os elementos de conexão. A impedância de entrada Z pode incluir filtro para reduzir ruído de fundo da fonte. O dispositivo de acoplamento CD, também chamado de quadripolo (ou rede de duas portas), e a impedância de entrada Z_{mi} caracterizam a entrada do sistema de medição MI. Se o objeto em teste possuir um terminal para aterramento, usa-se o circuito da figura 34(a), podendo-se incluir um acoplamento óptico OL no lugar do cabo de conexão blindado CC. O circuito da figura 34(b) oferece sensibilidade um pouco maior, mas, ante falhas no objeto sob teste [83], como curto-circuito, tem o risco de danificar o sistema de medição.

Por exemplo, no circuito de detecção de DP da figura 35, o objeto de teste (C_a – capacitor sob teste – representando um isolamento) estaria inserido de acordo com a configuração básica da IEC60270, mostrada na figura 34(a).

Figura 35 – Circuito de detecção de DP.



Fonte: Adaptado de [114].

O capacitor e o dispositivo de acoplamento formam um filtro passa-altas, configurado em uma rede de compensação pela série do capacitor de 150 pF com o paralelo do capacitor de 220 pF a um resistor. O dispositivo de acoplamento CD é integrado pelos dois diodos zener – formando um limitador de tensão de pico – e o resistor de 50 Ω.

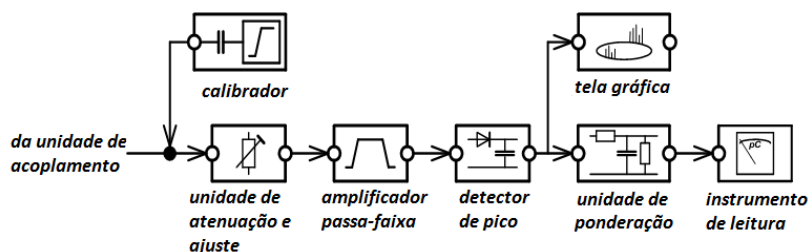
3.2.2.2 Instrumentos de medição de DP

Em geral, o pulso de corrente da DP apresenta largura média na ordem de dezenas de nanosegundos (ns) e frente do pulso com tempo de subida ou *rise-time* na ordem de picosegundos (ps) [51]. Para detectar e avaliar esses pulsos o instrumento de medição deve facilitar sua aquisição com adequada sensibilidade e distinguir entre o pulso gerado da DP e o ruído externo, além de identificar a causa e o local em que aconteceu [92].

Os sinais mensuráveis das DP podem ser processados analógica ou digitalmente.

Quando analógicos – como mostrado pelo diagrama de blocos na figura 36 –, o instrumento de medição requer unidade de atenuação e ajuste para condicionar o nível do pulso da descarga, visando a adequação da magnitude de entrada. Quando usado o circuito da figura 34a, C_k e Z_{mi} configuram um filtro passa-altas, para isolar o sinal de interesse, capturado nos terminais do objeto sob teste. Em seguida, o pulso de corrente é integrado para avaliar a carga aparente q , por meio do amplificador passa-faixa. O detector de pico e a unidade de ponderação, combinados com o instrumento de leitura, indicam a magnitude repetitiva dos valores de pico da DP, como definido na IEC60270 [96].

Figura 36 – Diagrama de blocos de um instrumento de medição analógico de DP.



Fonte: Adaptado de [96].

Para garantir medições comparáveis, com adequada reprodutibilidade, são especificadas, pela norma IEC60270, as características, tanto de frequência quanto da resposta do trem de pulsos, dos instrumentos [96]. A tela ou interface gráfica pode ser um osciloscópio, embutido ou externo, ou a tela de um computador, possibilitando visualizar os pulsos de DP alocados segundo a fase (resolução em ângulo de fase).

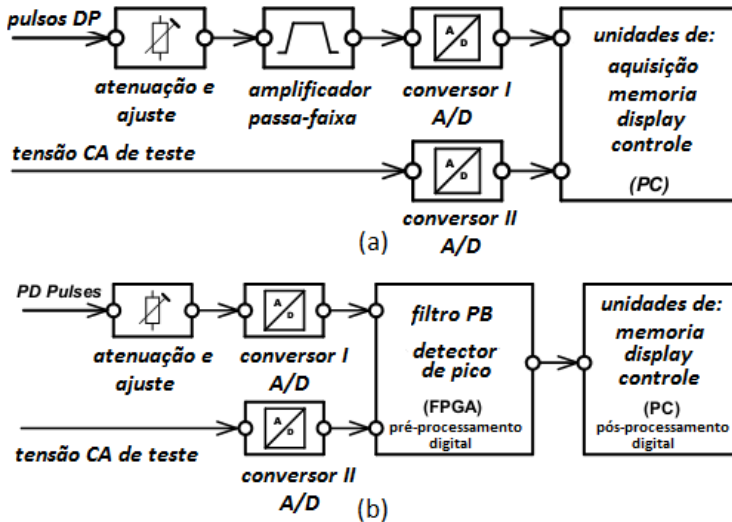
Os sistemas de medição de DP quando digitais, com processamento através de sistemas computacionais seguem dois princípios como representado na figura 37: pré-processamento de sinais analógico e pós-processamento digital; e, pré-processamento e pós-processamento digitais.

Com pré-processamento de sinais analógico e pós-processamento digital (Figura 37a), o sinal analógico capturado e condicionado é fornecido a um sistema digital de processamento, que permite a sua visualização e avaliação de carga aparente e grandezas relacionadas. O pulso capturado do objeto é integrado no filtro passa-banda analógico, de maneira semelhante a que ocorre no sistema analógico de detecção de DP, e digitalizado, posteriormente, em conversor A/D (analógico a digital), como também é convertida a tensão de teste relativa ao instante em que acontece a DP. Em seguida, os sinais digitalizados passam pela unidade de aquisição e visualização, com resolução em ângulo de fase, permitindo pós-processamento e análise posterior [96].

Com pré-processamento e pós-processamento digitais, como mostrado na figura 37(b), os pulsos de DP são apenas ajustados a níveis adequados, para logo serem capturados pelos conversores A/D, em tempo real, junto com a tensão de teste. A filtragem passa-banda e

detecção de pico podem ser feitas depois da conversão A/D, por um FPGA (*Field-Programmable Gate Array*). Assim, este conceito – que comporta redução de ruído dos sinais (*denoising*) – amplia as capacidades de análise da forma de onda, permitindo reconhecimento de diferentes fontes de DP em equipamentos de alta tensão [96].

Figura 37 – Diagrama de blocos de instrumentos de medição digital de DP.



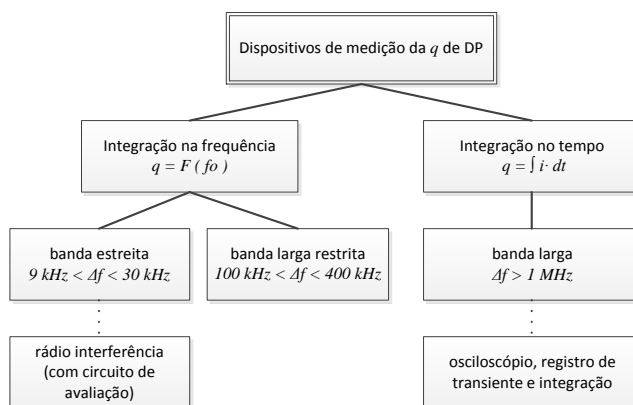
- a) com pré-processamento de sinais analógico – pós-processamento digital e
 b) com pré- e pós-processamento digital.

Fonte: Adaptado de [96].

A principal característica dos instrumentos de medição digital de DP é a capacidade de armazenar os parâmetros de carga aparente q_i , tensão de teste $u(t)$ e ângulo de fase Φ_i , de cada evento de DP, referidos ao instante de ocorrência t_i . Tal característica garante não somente a avaliação das grandezas relacionada às DP, recomendadas pela IEC60270 (conforme visto na secção 3.1.3), como também permite uma maior análise da complexa atividade de DP [96], além do reconhecimento de padrões associados aos tipos de defeitos [111].

A teoria apresentada por Kuffel [83] e pela norma IEC60270 [82] permite classificar os dispositivos para medição da carga aparente q , quanto aos métodos e largura de banda para avaliação dos pulsos, conforme a figura 38.

Figura 38 – Classificação dos dispositivos de medição de carga aparente de DP.



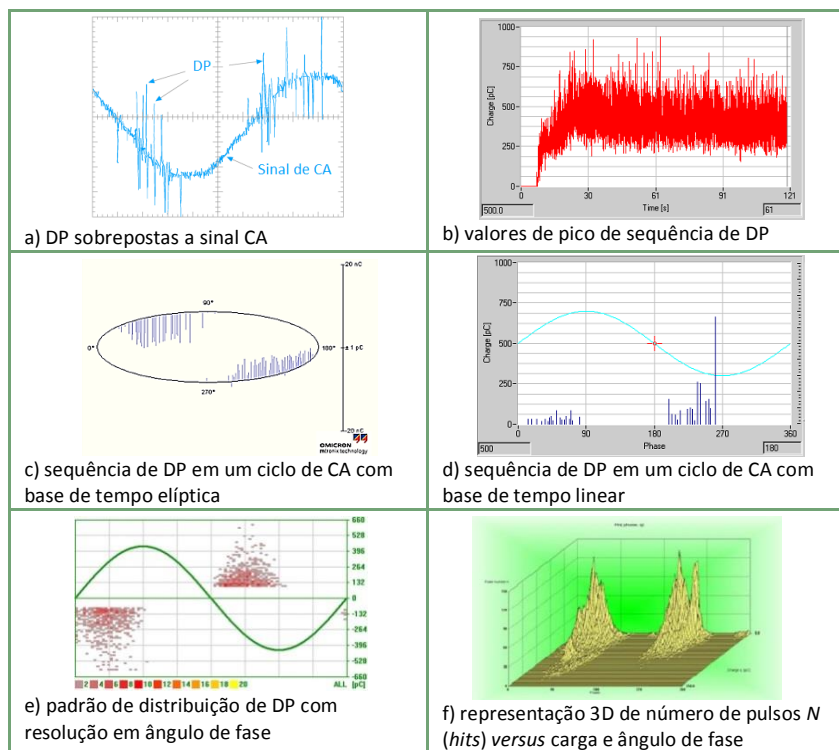
Fonte: Adaptado de [104].

O mercado disponibiliza múltiplos sistemas de detecção e medição de DP que se inserem na classificação relacionada, cujos parâmetros indicados de largura de banda são apenas uma referência. A grande maioria é dotada de telas ou interfaces gráficas de visualização, analógicas ou digitais, que permitem avaliar fase dos pulsos em relação à tensão aplicada de teste. São denominados equipamentos com resolução em ângulo de fase (*phase resolved detectors*) [51], que são úteis para avaliar o tipo de DP segundo o padrão dos sinais registrados [94][101]. A resposta fornecida pelos sistemas de medição digital de DP disponibiliza adicionalmente, grande variedade de curvas, gráficos e estatísticas, como apresentado na figura 39, com possibilidades estendidas de análise da forma do pulso de DP e *denoising*, por meio das transformadas de Fourier e *Wavelet* [51][109].

A interface gráfica pode projetar os pulsos de DP simultaneamente a um ciclo completo de alimentação senoidal, tanto em de tempo linear, sobre plano cartesiano, quanto em base de tempo elíptica, onde o ciclo positivo é representado pela parte superior da elipse e o ciclo negativo pela parte inferior, como ilustra a figura 39(c).

Os sinais detectados, normalmente se agrupam e visualizam conforme t_i , magnitude especificada de q_i (em pC), $u(t)$, Φ_i e número de pulsos por unidade de tempo N (também chamados de *hits*); entre outros. Podem ser visualizados como gráficos 2D ou 3D (2,5D ou pseudo-3D) de N em função de outra grandeza de interesse.

Figura 39 – Representação de respostas de DP sincronizadas em sinais de corrente alternada senoidal.



Fonte: a) [115]; b), d) e f) [96]; c) [116]; e e) [117].

3.2.2.3 Medições em objetos com enrolamentos e cabos

Qualquer um dos circuitos de ensaio relacionados pela IEC60270 pode ser usado para avaliar cabos e equipamentos com enrolamentos, isto é, para objetos com elementos capacitivos e indutivos distribuídos. Para alguns desses objetos, a tensão de ensaio pode ser induzida; por exemplo, o enrolamento de alta tensão de um transformador pode ser excitado pelo enrolamento de baixa tensão. Embora as normas não contenham tratamento detalhado para medição de DP em objetos com elementos distribuídos [82][89], e motores de baixa tensão [52], alguns pontos merecem destaque, dado a seguir, face a importância que têm no contexto.

Fenômenos de atenuação: devido às perdas nos enrolamentos, ao longo de cabos e no isolamento, a grandeza registrada no terminal do objeto pode diferir, em magnitude, daquela do ponto onde se origina [82][89]. Os pulsos de DP perdem energia enquanto viajam pelas linhas em que são transmitidos. A energia perdida κ é função da distância percorrida pelo pulso z e da frequência f conforme a equação (20) [118],

$$\kappa(z, f) = e^{-\alpha(f)z}, \quad (20)$$

onde α é o coeficiente de atenuação, dependente da frequência, normalmente expressado em Np/m [118]. O neper (Np) é utilizado para expressar os valores de grandezas adimensionais, e, transmite informações sobre razões de grandeza da natureza logarítmica (baseado no uso do logaritmo neperiano – ou natural) [33].

Fenômeno de ressonância e reflexões:

A grandeza registrada no terminal de um enrolamento ou cabo sob ensaio pode ser modificada por fenômenos de ressonância ou por reflexões nos terminais. Isto é especialmente importante, se o instrumento usado tem resposta à frequência de banda estreita. Fenômenos de reflexão (por exemplo em cabos) podem ser levados em consideração utilizando-se técnicas de calibração especiais, tais como geradores ou pulsos duplos (NBR 6940:1981, p.27) [89].

Uma DP gera dois pulsos de igual amplitude que viajam em sentidos opostos, desde o ponto onde se manifestam, ao longo do fio condutor. Dependendo da impedância equivalente do condutor, eles são refletidos com maior ou menor intensidade, formando uma série (trem de pulsos) que vão diminuindo gradualmente até sumirem abaixo do nível de ruído [118]. Os pulsos refletidos podem causar medidas errôneas em motores e transformadores, pois são detectados como DP adicionais, demandando medidas corretivas e avaliação da fonte de origem e severidade [96][118].

Características de impedância: nos ensaios de DP, um objeto com enrolamentos não se comporta como uma simples capacitância C_a (do modelo ABC da figura 29, pág. 78), mas frequentemente tem características de impedância de surto, geralmente com alguma capacitância concentrada em paralelo, além da própria indutância [89].

Localização de descargas: vários métodos podem ser usados para localizar DP em objetos com enrolamentos ou em cabos. Alguns desses métodos são baseados em medições simultâneas em dois ou mais

terminais do objeto sob ensaio [82][89]. Os métodos mais comuns para localizar a fonte de DP são a reflectometria no domínio do tempo (TDR – *Time-Domain Reflectometry*) e a análise de tempos de chegada (ATA – *Arrival Times Analysis*) [118]. O primeiro (TDR), considera as características do trem de pulsos gerado pela reflexão de uma DP nos terminais do objeto, e, o segundo (ATA), realiza a avaliação dos sinais de vários sensores alocados ao longo do fio condutor.

3.2.2.4 Erros na medição de sinais digitalizados

O uso de técnicas digitais para medição em ensaios de impulso de alta tensão tem se tornado muito difundido e é empregado pela literatura especializada [83]. A norma IEEE Std 1057-2007 abrange todos os registradores digitais para uso geral, a IEEE Std 1122-1998 tem como escopo os registradores digitais para medições em ensaios de impulso de alta tensão e a IEC61083-1:2001 é focada em instrumentação e software para o mesmo propósito.

A digitalização e reconstrução de sinais nos conversores A/D ideais leva a dois tipos de erro, geralmente referidos como erros de quantização e erros de amostragem de tempo discreto [83]. Em conversores reais se tem, além disso, erros sistemáticos, que podem ser parcialmente compensados por meio de calibração, e erros dinâmicos de natureza randômica, mais destacados em digitalização de sinais de frequências altas ou transientes rápidos de um sinal [83].

A norma IEC60270, no anexo E, apresenta algumas recomendações para aquisição digital de grandezas de DP [82]. O texto é focado em instrumentos com processamento de respostas individuais de carga aparente q , cujo valor de pico da resposta seja considerado proporcional ao valor da carga individual q_i , da corrente do pulso de DP. Recomenda que o sinal de tensão seja continuamente digitalizado e registrado durante o teste ou, pelo menos, nos períodos de tempo em que é tomado o valor da q . Considera que um instrumento digital de medição de DP com incerteza inferior a 5% do valor lido, poderia registrar a fase da tensão de teste, com os fatores de escala apropriados, desde que a resolução seja equivalente a pelo menos 8 bits. Recomenda, por fim, uma taxa de amostragem periódica de pelo menos 100 amostras por ciclo do sinal CA ou de 4000 amostras por segundo para CC.

Deve-se tomar cuidado para evitar erros na medição de corrente média de descarga e, em geral na medição de carga aparente, causados pela saturação de amplificadores. Esse efeito pode decorrer da alta taxa de repetição de pulsos, pulsos acontecendo com tempos de separação menores que a resolução de tempo do instrumento de detecção de DP e

magnitude de carga aparente acontecendo abaixo do nível de disparo (*threshold level*) do instrumento de DP [96].

Considerado o sistema de detecção e medição das DP, que fornece medições adequadas das grandezas de interesse, a seguir é importante considerar quais são os fatores principais que poderiam intervir tanto na atividade quanto na detecção dessas descargas.

3.3 CONDIÇÕES QUE INTERVÊM NA ATIVIDADE E DETECÇÃO DE DESCARGAS PARCIAIS

Alguns fenômenos têm maior ou menor influência na atividade das DP ou nas suas características. Os valores de campo elétrico de início E_i e extinção E_e dependem de diversos fatores, entre os quais estão as propriedades do gás (temperatura e principalmente pressão), a forma e o tamanho da cavidade e o mecanismo específico de descarga [51]. Os valores de E_i e E_e podem se relacionar com as tensões de início e extinção, u_i e u_e , considerando a geometria da cavidade [119].

Em uma cavidade, para que ocorram DP, o campo elétrico local deve ultrapassar certo valor de campo elétrico crítico. Pode ser considerada de maneira análoga no caso de descargas em gases entre eletrodos metálicos, dada pela curva de Paschen [51][119], que relaciona tensão mínima de descarga V como função f do produto da **pressão** do gás p e a **distância** entre eletrodos d , conforme a equação (21),

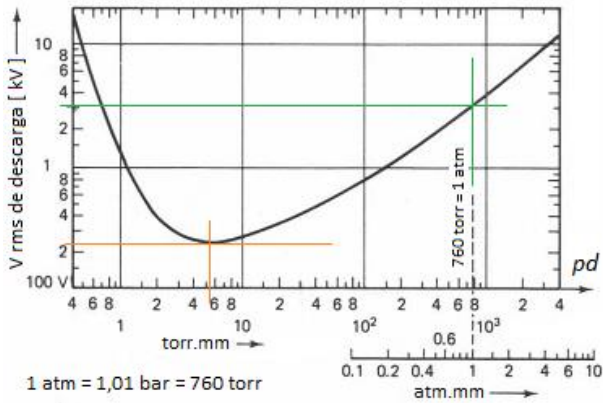
$$f(p \cdot d) = V. \quad (21)$$

A curva de Paschen para o ar, mostrada na figura 40, indica os valores de tensão mínima de descarga em função do produto $p \cdot d$. Para o ar com pressão atmosférica padrão de 101,325 kPa (1 atm = 1,01325 bar = 760 torr) e eletrodos separados de 1 mm, a tensão de descarga corresponde a 3 kV; isto é, tem uma rigidez dielétrica de 3 kV/mm. Assim também, de acordo com a mesma curva, o potencial mínimo absoluto de descarga elétrica para o ar corresponde a 327 V, com produto pd de 7,594 Pa·mm (5,67 torr·cm) [120].

A tensão mínima de ruptura, ou rigidez dielétrica, vai depender também de outros fatores, como o tipo de isolamento (por exemplo, gás), o material e a geometria dos eletrodos condutores. A figura 41 apresenta a variação das curvas de Paschen para diferentes elementos. Na figura 41(a) os gases (ar, CO₂, H₂) correspondem aos meios isolantes para um mesmo tipo de eletrodo e, na figura 41(b), o gás isolante é o ar com

curvas características para eletrodos de três metais diferentes – bário, magnésio e alumínio.

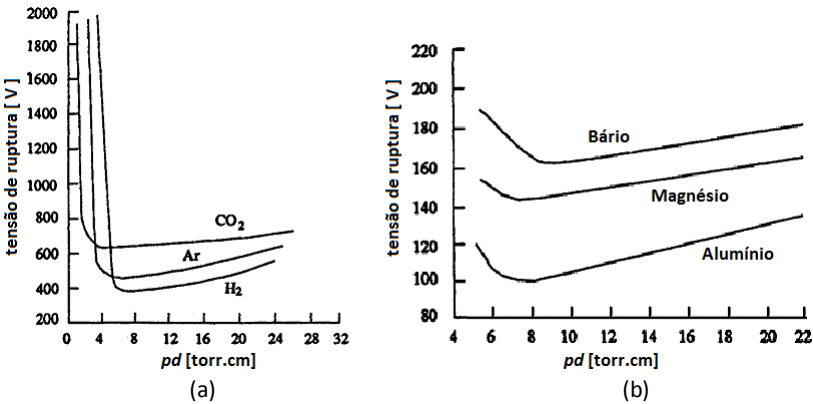
Figura 40 – Curva de Paschen para o ar.



Fonte: Adaptado de [112].

Nota: O uso da unidade torricelli (torr), fora do SI, se mantém nas figuras devido a sua utilização na literatura consultada. O pascal (Pa) é a unidade SI para exprimir a grandeza pressão [33]. 1 torr = 133,322 Pa.

Figura 41 – Curvas de Paschen para três gases e para três metais.



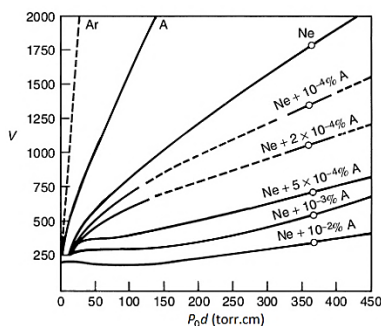
Fonte: Adaptado de [120].

Em geral, quando é usado ar como isolante, pode-se dizer que reduzir a rigidez dielétrica do ar vai favorecer a atividade de DP [121].

3.3.1 Presença de gases no entorno

As misturas de gases podem reduzir a capacidade dielétrica característica que apresentam isoladamente, facilitando a produção de descargas elétricas. Assim, por exemplo, uma pequena adição de argônio em neônio reduz a rigidez dielétrica abaixo daquelas que têm esses gases quando puros. Esse fenômeno é conhecido como o efeito Penning (*Penning effect*) [83]. A figura 42 apresenta uma série de curvas de Paschen para o ar, argônio A, neônio Ne e misturas de neônio com diferentes concentrações de argônio, que mostram a forte redução da rigidez dielétrica na configuração indicada. Esse efeito, que promove a ionização pela desenergização de átomos metaestáveis, pode influenciar na atividade de DP superficiais em isolamentos sólidos, facilitando as descargas entre os eletrodos.

Figura 42 – Curvas de tensão de ruptura para diferentes misturas de neônio-argônio para duas placas paralelas separadas de 2 cm com temperatura de 0 °C.



Fonte: Adaptado de [83].

3.3.2 Frequência e polaridade da tensão aplicada

Para fios condutores isolados com verniz ou esmalte (*enamel*), empregados em enrolamentos elétricos, a tensão de início *PDIV* é menor quando o isolamento é submetido a uma corrente com polaridade alternada do que quando submetido a pulsos unipolares [122]. Isso se deve ao acúmulo de carga na superfície do verniz isolante, que eleva o campo elétrico nas proximidades sob esforços elétricos alternados e se reduz sob esforços unipolares [123][124].

Dependendo da geometria dos eletrodos e do gás isolante próximo aos condutores, a rigidez dielétrica pode ser diferente para pulsos de tensão negativos quanto para positivos [83] assim como é diferente o número de DP por segundo (N) para cada semiciclo de CA [84].

No passado, tinha-se sugerido que, de acordo com a Lei de Paschen, as DP não se podiam apresentar abaixo da tensão mínima de início da descarga *PDIV*. Entretanto, foi observado mediante intensificação de imagem, que tais DP aconteciam em motores de baixa tensão alimentados por inversores com modulação de frequência PWM (*Pulse-Width Modulation*) [125].

A evolução dos semicondutores de potência tem levado à criação de chaves mais eficientes, porém, mais rápidas. As elevadas frequências de chaveamento das chaves eletrônicas empregadas nos inversores atuais (comumente transistores IGBT) acarretam algumas consequências indesejáveis, tais como o aumento de emissão eletromagnética e a provável incidência de picos de tensão, bem como elevados valores de dV/dt (taxa de variação da tensão no tempo), nos terminais dos motores alimentados por inversores [...] PWM (WEG, 2009, p.15) [63].

Dependendo das características de controle e da modulação PWM adotada, os inversores utilizados associados a motores de indução de gaiola podem gerar DP e sobretensões repetitivas nos terminais de alimentação, em forma de trens de pulsos, que podem reduzir a vida do motor pela degradação do seu sistema de isolamento [63][125].

Os inversores de frequência PWM podem produzir surtos com tempos de subida entre 50 ns e 100 ns, que podem incrementar a atividade de DP em motores e fios isolados trançados. Como consequência desses rápidos tempos de subida dos transitórios instantâneos, a maior parte da tensão cai nas primeiras espiras do enrolamento [126].

A norma IEC60664-1:2007 [55] indica que, a partir de ensaios acelerados de vida útil em frequências elevadas, o tempo de falha é inversamente proporcional à frequência da tensão aplicada. No entanto, para frequências acima de 5 kHz, outros mecanismos de falha podem se apresentar, como o aquecimento do dielétrico [55]. A IEC60664-4:2005 [127] estabelece que no ar, em condição de campo homogêneo, tanto as tensões de DP (*PDIV* e *PDEV*) como as tensões de ruptura elétrica são

significativamente influenciadas pela frequência da tensão aplicada [127]. Tal norma apresenta algumas curvas de ruptura elétrica em função da frequência aplicada (consideram-se condições ideais de laboratório e não especifica tempo de exposição, geometria nem material dos eletrodos), na faixa de 50 Hz até 25 MHz, para diferentes espaçamentos de isolamento de ar a pressão atmosférica. Na chamada frequência crítica f_{crit} , acontece redução da tensão de ruptura a pressão atmosférica padrão.

A frequência crítica f_{crit} depende do valor de espaçamento [127], conforme as relações explicativas em (22),

$$f_{crit} = \frac{v}{\pi d} \rightarrow f_{crit} \approx \frac{0,2}{d} \text{ em MHz} , \quad (22)$$

onde o valor do espaçamento d é dado em mm. Assim, para $d = 4,0$ mm se tem $f_{crit} = 50$ kHz e para $d = 0,5$ mm se tem $f_{crit} = 400$ MHz.

Considerando que a atividade de DP é um processo estocástico [82], nem todos os surtos produzidos por um inversor de frequência com tempos de subida curtos vão produzir DP; mas, aplicando-se o numero suficiente de pulsos, ocasionalmente serão produzidas [126].

3.3.3 Meio ambiente – umidade e temperatura

Em geral, o rendimento de aparelhos elétricos é significativamente influenciado por variações em parâmetros ambientais como temperatura, pressão barométrica e umidade. Ensaio realizados em condições ambientais diferentes, e que produzam respostas diferentes, indicam que esses parâmetros do entorno podem afetar as características elétricas do objeto em teste [128].

A presença de vapor de água pode influenciar a resistência e a PDEV, pois facilita a condutibilidade elétrica favorecendo o escoamento de carga com menores efeitos de memória (ou seja, impede a sua acumulação) [121]. Para alguns materiais, aumentar a umidade significa reduzir rigidez dielétrica. No entanto, diminuir a umidade pode ser desfavorável em algumas circunstâncias, pois pode aumentar a retenção de carga eletrostática de alguns materiais como a poliamida [55].

Umidade e temperatura influenciam significativamente a PDIV, e, portanto, a atividade de DP [129][130], devido a sua ação combinada com a carga espacial e a intensidade de campo elétrico no espaçamento entre condutores [121].

O efeito da umidade sobre as DP não é totalmente claro [129]. Estudos em alguns isolamentos indicam que quanto menor a umidade

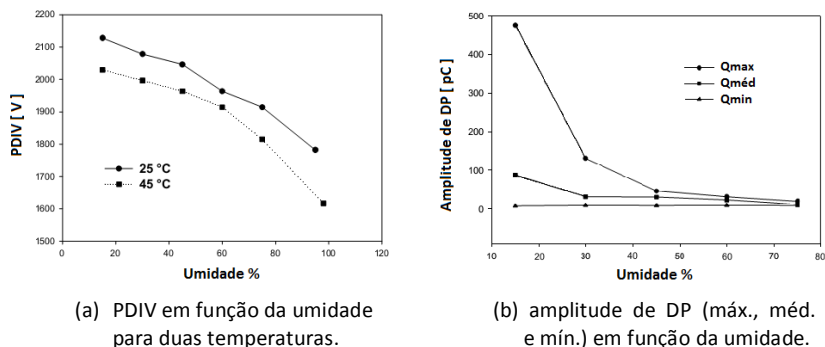
relativa, maior a atividade de DP [131]. Entretanto, para fios condutores, como aqueles usados em enrolamentos de motores, tem-se observado que, se a umidade relativa aumenta, a PDIV diminui [121][132], favorecendo a atividade de DP. O comportamento das DP em função da umidade não é bem definido e está sujeito a outros fatores, como tensão aplicada e temperatura. Em estudo conduzido para avaliar os padrões de resposta de DP a diferentes níveis de umidades relativas (UR) [130], observou-se comportamento atípico para 85% de UR, com forte aumento da PDIV e diminuição da atividade de DP.

A temperatura tem papel importante na atividade das DP. Respostas, como as apresentadas na figura 43(a), permitem interpretar que temperaturas maiores reduziram o nível de PDIV e facilitariam as DP. No entanto, o comportamento das DP não é tão simples. Estudos em fios condutores trançados mostram que em certos níveis de umidade combinados com temperaturas pouco maiores que a ambiente, entre 60 °C e 80 °C, o efeito nas DP pode ser menos evidente [132]. Observou-se, ainda, que para fios envernizados trançados, a atividade de DP pode ser duplicada com temperatura de 100 °C e 15% de UR [130].

Pesquisas adicionais em fios condutores isolados, indicam que se podem estimular as DP com temperaturas ainda maiores, entre 240 °C e 300 °C), diminuindo as magnitudes de PDIV e aumentando a atividade das DP (em *hits* por segundo) [124]. Essas temperaturas são superiores àquelas suportáveis pelos estatores de classe H (180 °C) ou C (220 °C).

O óleo de setup no interior de compressores herméticos poderia influenciar a atividade de DP no motor, pois pode variar as condições de temperatura, umidade e rigidez dielétrica dos condutores.

Figura 43 – Tensão de início (PDIV) e amplitude de descarga de DP em função da umidade.



Fonte: Adaptado de [121].

Temperatura e gradientes térmicos têm maior influência na atividade de DP em isolamentos submetidos à tensão de alimentação CC, se comparados com aqueles alimentados por fonte CA [99]. Contudo, estudos mais aprofundados são necessários para determinação dos reais efeitos da temperatura e umidade no comportamento da tensão de início das DP (PDIV) no sistema de isolamento de enrolamentos de motores de baixa tensão [126].

3.3.4 Materiais e geometria do sistema de isolamento

Os tipos de materiais e as características geométricas do sistema de isolamento elétrico também influenciam o comportamento da atividade das DP [121].

A variação de permissividade e condutibilidade elétrica imposta ao sistema de isolamento, dos estatores com enrolamento aleatório dos MIM, pelas diferentes características de seus elementos associados – tipo de verniz isolante, espessuras, espaçamentos, isolamentos de fundo, isolamentos de camada, posição, qualidade do ar e misturas com outros gases –, pode ter incidência direta na resposta de testes de DP.

O campo elétrico E_0^* que governa as descargas no ar, nas proximidades da superfície de um enrolamento, pode ser derivado da equação (23) [121],

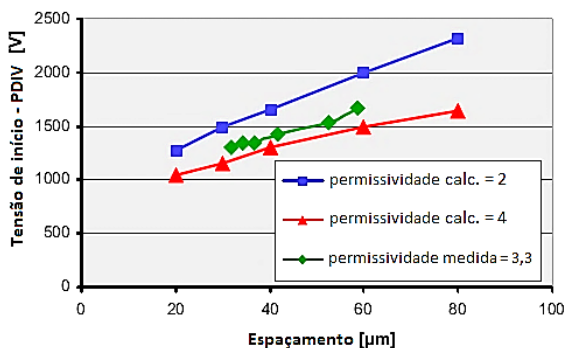
$$E_0^* = E_0 + \frac{\sigma_s \cdot d}{\varepsilon_0 \cdot d + \varepsilon \cdot l_0} , \quad (23)$$

onde E_0 é o campo elétrico na ausência de carga acumulada; ε e ε_0 são as permissividades do ar e do material isolante respectivamente; d é a distância entre eletrodos; l_0 é a separação de ar entre o isolamento e terra; σ_s é a carga superficial. Segundo a equação (23), qualquer variação em algum desses parâmetros terá como consequência a variação no campo e, assim, na tensão PDIV, modificando, portanto, a atividade de DP [121].

Para fios condutores dos enrolamentos dos MIM, a espessura da camada do verniz ou esmalte dielétrico e a permissividade do material isolante empregado (secção 2.5.5), representados como d e ε_0 na equação (23), determinam o nível da atividade de DP que pode se manifestar entre espira e espira ou entre espiras e pacote do núcleo do estator [121]. Variações na espessura da camada isolante dos fios tem resposta proporcional na tensão PDIV. A figura 44 apresenta duas curvas de PDIV em função da espessura, entre 20 μm e 80 μm , para

valores calculados de permissividade em dois materiais (azul, com $\varepsilon_0=2$, e vermelho, com $\varepsilon_0=4$), e mais uma, para valores medidos (verde, com $\varepsilon_0=3,3$). Observa-se que quanto maior espessura, maior a magnitude da PDIV, o que dificulta a atividade de DP; porém, esta fica ainda condicionada a outras características do isolamento como homogeneidade e qualidade.

Figura 44 – PDIV em fios condutores trançados em resposta ao aumento da espessura do isolante e a permissividade.



Fonte: Adaptado de [124].

Além de cavidades na camada isolante de fios condutores, podem ocorrer furinhos ou mini-furos (*pinholes*) nos isolamentos, resultado dos rigores da manufatura [1]. A especificação para fios esmaltados para enrolamentos prevê a existência de um pequeno número dessas imperfeições diminutas, por unidade de comprimento, em decorrência do processo de fabricação (NEMA Standard MW1000-1997, “*Magnet Wire*” *apud* [1]). Analogamente, conforme especifica a ABNT NM 60317-8:2006, é permissível a formação de até 4 bolhas de diâmetro maior que o raio do fio, quando avaliada a resistência do isolamento a ação de solventes como o refrigerante R22 (monoclorodifluoretano) [133].

O diâmetro das cavidades ou bolhas formadas nos isolamentos pode influenciar a manifestação e atividade de DP. Quando o diâmetro diminui, aumenta a atividade de DP. Entretanto, esse efeito se torna menos importante quando o isolamento é submetido a pulsos repetitivos de sobretensão [102].

O envelhecimento dos materiais isolantes também tem influência na atividade de DP, principalmente quando associado àqueles materiais

que têm sido submetidos a temperaturas acima da nominal [126]. De fato, a medição da carga aparente das DP é frequentemente usada como ferramenta para avaliar o estado e envelhecimento do sistema isolante elétrico em equipamentos de alta tensão e, mais recentemente, em motores de baixa tensão alimentados por inversores de frequência [1].

Um estudo mais aprofundado no assunto dos materiais usados na isolamento de fios condutores para enrolamentos (esmaltes e vernizes isolantes), síntese e caracterização, fabricação, ensaios e normatividade, pode ser auxiliado pelo trabalho de Jansen [134].

3.3.5 Materiais e geometria dos eletrodos (fios condutores e núcleo de ferro)

Estudos de descargas elétricas feitos sobre diferentes materiais e geometrias de eletrodos têm demonstrado que variações desses parâmetros, ainda que pequenas, produzem mudanças na resposta dos testes [83].

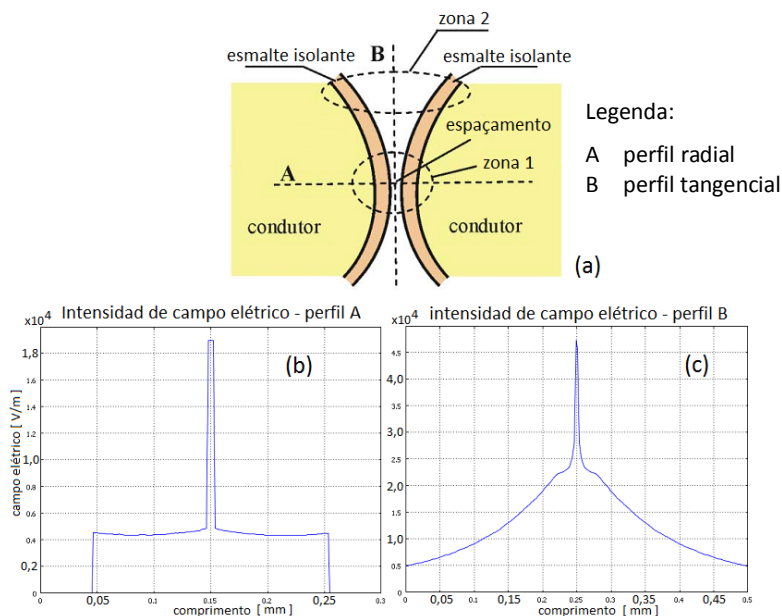
Alguns estudos não concordam com os valores de rigidez dielétrica para cátodos de eletrodos de diferentes materiais, como cobre ou alumínio, e sua representação em curvas de Paschen [135][136]. Entretanto, fica evidente que o tipo de material e a geometria, tanto do cátodo quanto do isolamento, influenciam no valor da tensão de ruptura elétrica mínima, a partir do qual se podem produzir as descargas elétricas [120]. A configuração dos eletrodos pode produzir campo elétrico não homogêneo, pela concentração e distribuição conforme a sua geometria. Por exemplo, em configurações ponta-plano são favorecidas as descargas corona, pela acumulação de carga nas proximidades das pontas agudas [83]. Essa e outras configurações, como coaxiais, barra-plano, ponta-ponta, esfera-plano entre outras, terão seus padrões de descarga característicos, as quais podem ser consultadas e aprofundadas na literatura sobre alta tensão e isolamento [1][83][120][137].

Admitindo-se a possibilidade de submeter um MIM a um ensaio de DP, poder-se-ia considerar os fios condutores e o pacote do núcleo de aço laminado como eletrodos isolados pelo ar e pelo sistema de isolamento já comentado (seção 2.5.5). Da mesma forma, poder-se-ia ter a combinação de eletrodos fio-fio. Assim, as respostas de DP iriam depender do tipo de material dos fios condutores (alumínio ou cobre), da pureza dos metais, da qualidade e composição do aço, e das possíveis

configurações geométricas que podem se apresentar de fios entre si e deles com o pacote.

Ensaio em pares trançados de fios condutores isolados, revelaram que a rigidez dielétrica das amostras varia em função do diâmetro dos mesmas [84]. Na figura 45(a) se representa uma seção transversal de dois fios condutores próximos, onde se definem duas zonas características de atividade de DP. Na zona 1, onde ficam mais próximos os dois condutores, o campo elétrico é uniforme e mais intenso para o ar (figuras 45b e 45c), por causa da permissividade do isolamento sólido e pelo fato das DP serem governadas pela PDIV. Na zona 2 o campo é não homogêneo e tem componentes tangenciais, manifestando atividade de DP em tensões superiores às PDIV relacionadas à superfície do verniz ou esmalte isolante (*enamel*). No estudo, a diminuição do diâmetro de fio resultou em aumento da intensidade da atividade de DP com menor PDIV [84]. Tal resultado permite interpretar que a redução no diâmetro do fio condutor favorece a atividade de DP.

Figura 45 – Seção transversal de dois fios condutores próximos e intensidade de campo elétrico em perfil radial e tangencial.



Fonte: Adaptado de [84].

3.3.6 Efeito pelicular (*skin effect*)

Esse efeito, caracterizado pela tendência da corrente elétrica alternada em se distribuir na periferia do condutor e não percorrer seu interior, é responsável pelo aumento da resistência elétrica efetiva [1]. A ocorrência do fenômeno depende da frequência aplicada, da intensidade da corrente e das características do material e geometria dos condutores [22].

No MIM, o efeito pelicular pode ocorrer nos condutores do estator, do rotor [47] e no núcleo de aço laminado [138]. Entretanto, em se tratando da atividade de DP, considera-se importante apenas os seus efeitos nos enrolamentos do estator, em máquinas alimentadas a partir de inversores de frequência PWM (seção 3.3.2).

O conteúdo espectral dos surtos advindos da alimentação PWM é de alta frequência. Consequentemente os surtos de corrente nos condutores dos enrolamentos podem ser limitados fortemente pelo efeito pelicular [139]. Só seriam consideráveis os efeitos das frequências altas, em torno de 1 MHz, dentre os harmônicos contidos no sinal PWM, cujas amplitudes vão depender do tipo de modulação empregada, do método de controle, da estrutura do inversor implementada (número de pulsos de controle) e da impedância dos cabos de ligação [63].

O efeito pelicular não deve ser tão relevante para a geração das DP em MIM, visto que o aumento da resistência elétrica efetiva pode atenuar a amplitude dos harmônicos dos sinais, provocando perdas adicionais no condutor e no núcleo laminado [16][139]. Entretanto, pode auxiliar na detecção das descargas, pois a propagação dos pulsos de DP é dependente da frequência [87].

3.3.7 Ruídos

Conforme a IEC60270, medições quantitativas das grandezas de DP são dificultadas por interferências causadas, basicamente, por dois tipos de perturbações que podem ser caracterizadas como: (i) as que ocorrem ainda com o circuito de teste não energizado e que não dependem dele, e (ii) aquelas que somente ocorrem com o circuito de teste energizado, mas não no objeto em teste [82].

As perturbações do tipo (i) são interferências de espectro discreto (*DSI – Discrete Spectrum Interference*), oriundas de transmissões de rádio e de sistemas de comunicação com portadoras baseadas em linha de transmissão; interferências com formato de pulsos periódicos,

originadas em sistemas de comutação, eletrônica de potência ou outro tipo de chaveamento periódico; interferências com formato de pulsos estocásticos, advindos de descargas atmosféricas; raios cósmicos e operações de chaveamento esporádico; além das interferências provocadas pelo efeito corona em outro equipamento. Esse ruído é geralmente modelado como ruído térmico ou ruído branco [109]. As perturbações do tipo (ii) são interferências devidas aos elementos do circuito e do sistema de medição, suas conexões e interligações quando energizados [82].

Os ruídos representam a principal barreira para uma eficiente medição de DP em campo. Eles são de diversas naturezas, apresentando formas, amplitudes e características diferentes em cada instalação. Algumas técnicas existentes, capazes de minimizá-los, são conhecidas de maneira consagrada; como, por exemplo, o emprego de filtros analógicos [105]. Diniz, em seus estudos [109], faz interessante revisão de métodos e algoritmos para redução e supressão de ruído dos sinais de DP, visando sua classificação em padrões típicos.

3.3.8 Radiação

As DP podem ser estimuladas por fontes de radiação, como os raios X e gama. De forma geral, a ionização por raios X é semelhante à fotoionização, visto que, em ambos os casos, a fotoabsorção leva à excitação ou ionização do átomo [51], que pode induzir cargas elétricas no interior de uma cavidade, na superfície de um isolante ou no meio que rodeia um eletrodo. Os trabalhos de Filho [119] e Silva [51] desenvolvem amplamente o assunto para raios X contínuos e pulsados, mostrando que é possível estimular externamente a atividade de DP.

3.3.9 Comprimento dos cabos de conexão

Os cabos de conexão e os fios condutores podem ser modelados como linhas de transmissão com parâmetros distribuídos [82][90] frente a pulsos rápidos, como: motores alimentados por inversores de frequência, DP, e outras fontes com conteúdo harmônico de elevada ordem de frequência. Essa representação é dada por impedâncias distribuídas em uma série infinita de componentes de resistências, indutâncias, capacitâncias e condutâncias [140] conectadas em série e paralelo. Cada pulso de energia transmitido pelo cabo, sob o efeito desses componentes, acaba sofrendo alterações.

O tempo de subida (*rise time* – que caracteriza o gradiente dV/dt), o comprimento e o tipo do cabo são fatores predominantes para a incidência de picos de tensão nos terminais do motor [63]. Quando o motor está próximo da fonte de alimentação ou de um circuito de ensaio para detecção de DP, esse efeito dos cabos de conexão pode ser desconsiderado, pois ele só é relevante quando os comprimentos excedem várias dezenas de metros [63].

3.3.10 Aspectos construtivos

Estatores estão sujeitos a variações geométricas em relação ao projeto, decorrentes do processo de fabricação, do desgaste de ferramentas para estampagem das lâminas do núcleo [69], dos desvios na produção de aços e dos estresses mecânicos e térmicos dos materiais. Tais desvios de forma podem levar a mudanças das propriedades magnéticas e produzirem variações elétricas representadas por perdas resistivas, dissipadas em forma de calor [16], que poderiam alterar a resposta de um ensaio de DP. Essas pequenas variações geométricas poderiam modificar, também, os espaçamentos efetivos entre condutores elétricos e entre sistema de isolamento e núcleo magnético, com efeito na relação de rigidez dielétrica, função do produto pressão-distância (curvas de Paschen), influenciando a atividade de DP [119].

A disposição final das espiras em relação à isolamento com o núcleo laminado ou com outras camadas do enrolamento, pode ser o aspecto construtivo mais relevante do MIM, em se tratando de um teste de DP [98][122].

Espaçamento entre fios e núcleo do estator ou variações no isolamento podem ter efeito nas DP, considerando a concentração do campo elétrico entre fios condutores e núcleo, determinada pela diferença de potencial aplicada, entre condutores (maior que a $PDIV$) e o núcleo aterrado (com potencial zero), e a distância entre eles.

A disposição final das espiras (local e espaçamento) na cabeça das bobinas (*end-turn*), logo após a conformação dos enrolamentos, também pode ter efeito na atividade das DP. De acordo com a literatura disponível sobre a teoria e projeto de motores de indução de pequeno porte, os valores da indutância [11] e da reatância de dispersão na cabeça das bobinas são submetidos a um alto grau de incerteza, pois essa região do enrolamento gera campos magnéticos com formas muito complexas no espaço tridimensional, difíceis de serem estimados [141], cujas grandezas influenciam também na atividade das DP.

3.3.11 Natureza estocástica de algumas propriedades das DP

Algumas das interações individuais ou estágios na atividade de DP podem se considerar como determinísticas. No entanto, esses estágios são suficientemente numerosos, complexos e ainda não bem conhecidos, que impedem caracterizar inteiramente a atividade de DP a partir de uma única interação determinística [108]. Só o processo de ignição das DP é considerado em si mesmo de natureza randômica [88][99], podendo haver variação estatisticamente significativa em propriedades tais como amplitude, forma do pulso e tempo de ocorrência [108]. Entretanto, variáveis randômicas (como amplitude de pulso e tempo de ocorrência) podem se especificar em termos de distribuições de probabilidade com largura finita [108].

Todas as condições relacionadas na seção (3.3), capazes de intervir tanto na atividade como na detecção das DP, podem influenciar, em maior ou menor grau, na interpretação das informações obtidas a partir de ensaios, possibilitando ou inviabilizando a avaliação eficiente de defeitos em sistemas de isolamento de motores.

3.4 POSSIBILIDADES E DIFICULDADES NA INTERPRETAÇÃO OBJETIVA DOS DADOS DE DESCARGAS PARCIAIS

Visando a aplicação das DP para avaliação de defeitos em sistemas de isolamento de estatores de MIM, faz-se necessário salientar dois aspectos, os quais devem ser tratados separadamente [90]:

- as DP não são causas de defeitos, mas sintomas deles;
- o sistema de isolamento de um enrolamento não é tão exato quanto um arranjo de capacitores pode modelar (figura 29, p. 78); pois, além disso, é altamente indutivo e se comporta como uma linha de transmissão com parâmetros distribuídos.

Algumas das dificuldades encontradas na interpretação das medições de DP em máquinas girantes em condição off-line, conforme a IEEE 1434 [87], são: (i) variações no tipo de isolamento; (ii) a resposta das DP só pode ser comparada com resultados de testes em enrolamentos de mesmo projeto, e a partir de sistemas de medição idênticos; (iii) as leituras dos instrumentos de medição não elétricos e de radiofrequência não podem identificar se os pulsos de DP são positivos ou negativos, para atribuir-lhes um padrão que identifique defeitos por

delaminação ou por descarga em ranhuras; e (iv) não identificam de modo confiável o local onde ocorreram as descargas.

As variações no sistema de isolamento (seção 3.3.4) e os desvios no processo de enrolamento dos estatores (3.3.5) são algumas das causas da dificuldade de detecção de defeitos em testes de surto [58]. Estas mesmas variações podem acabar interferindo, também, na avaliação das DP, de forma que se faz “necessário trabalhar com uma tolerância na configuração dos testes a fim de evitar que estatores contendo apenas variações de processo sejam confundidos com produtos defeituosos” (MARTÍNEZ, 2008, p. 17) [58].

Níveis aceitáveis de atividade de DP variam com o sistema de isolamento. Um nível particular de DP internas pode ser aceitável em um tipo de material isolante, mas não em outro [87] (por exemplo, poliéster, polietileno, poliamida, nylon, epóxi, papel e mica). Assim, seria necessário dispor testes com respostas de atividade de DP, perfeitamente identificadas e padronizadas, para cada tipo de estator. Variações nas especificações elétricas, térmicas e mecânicas do isolamento dos condutores, causadas pelo tipo de verniz e espessura da camada, condições ambientais durante sua impregnação e cura, além dos esforços mecânicos durante a produção e o enrolamento, produzirão respostas diferentes na atividade de DP [55][58][123][134].

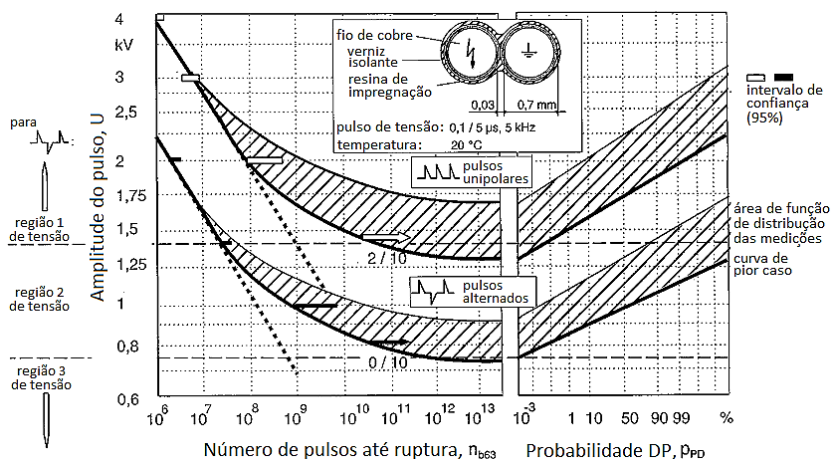
De qualquer forma, a comparação com resultados de peças consideradas boas, provenientes de enrolamentos de idêntico projeto, obtidas a partir de um mesmo sistema de medição [87] possibilitaria a aplicação de análise de DP para controle da qualidade. Nesse processo seria necessário considerar o desvio das respostas padrão frente às tolerâncias admissíveis no processo de fabricação.

A calibração em unidades de carga aparente, para avaliação de DP em frequências altas, é extremamente difícil [88]. A carga medida em um circuito externo (como especificados na IEC60270) pode diferir da carga real em ordens de grandeza (por exemplo, de 17 a 1 [90]). Nesse sentido as medições de DP são sempre relativas, a um tipo particular de isolamento e a um sistema de medição determinado, e uma calibração simplesmente assegura a mesma medição de pC para um conjunto de condições bem determinadas. Portanto, as leituras obtidas não poderiam ser consideradas absolutas (com mesma resposta de pC) para diferentes estatores [90].

A probabilidade de acontecer DP em fios condutores aumenta quando submetidos a pulsos repetitivos de tensão alternada (seção 3.3.2). Estudos têm sido conduzidos para avaliar o efeito dos inversores PWM nos enrolamentos de máquinas elétricas [98][122][123][142]

[143]. Dentre eles, destacam-se resultados (figura 46) que evidenciam as relações de falhas em dielétrico (como descarga completa ou ruptura) com a amplitude de pulsos de 5 kHz e tempo de subida de $0,1 \mu\text{s}$ ($5 \mu\text{s}$ de largura) [123]. O mesmo estudo relaciona a probabilidade de ocorrência das DP com a magnitude dos pulsos. Pode-se observar das curvas da figura que para pulsos alternados a tensão de descarga é menor que para pulsos unipolares. Também se observa, por meio da linha sólida grossa na parte direita, que a probabilidade de acontecer DP se inicia perto de 750 V, para pulsos alternados, e em 1000 V a probabilidade de ocorrência é de 50% (a área sombreada representa as funções de distribuição das DP medidas). Para tensões acima de 1400 V, a probabilidade é máxima, na configuração usada no estudo (dois fios de cobre de 0,7 mm de diâmetro, paralelos, de aproximadamente 2 m de comprimento, com isolamento de poliesteramida, impregnados com resina, enrolados como uma bobina de 10 voltas e raio de aproximadamente 2 cm, em temperatura de 20°C).

Figura 46 – Relação entre descarga elétrica e probabilidade de ocorrência de DP com a tensão do pulso aplicado.



Fonte: Adaptado de [123].

Ainda na figura 46 identificam-se três regiões de tensão segundo a probabilidade de ocorrência das DP para pulsos alternados, de acordo com os resultados obtidos: 1, totalmente provável; 2, probabilidade em função da distribuição; 3, probabilidade mínima.

A norma IEC 60664 estabelece que para tensões de pico abaixo 500 V, as DP são improváveis de ocorrer [55]. Entretanto, constatando-se a ocorrência de DP em tensões de teste relativamente baixas (entre 750 V e 1500 V [123]), vislumbra-se a possibilidade de aplicar o ensaio de DP em enrolamentos aleatórios de baixa tensão, como os do MIM, para avaliar defeitos no sistema de isolamento.

3.5 APLICABILIDADE EM ENROLAMENTOS ALEATÓRIOS DE BAIXA TENSÃO

A maioria das máquinas elétricas apresentam muitos locais susceptíveis à ocorrência de DP. O design da máquina, os materiais de construção, os métodos de manufatura, as condições de operação e as práticas de manutenção podem afetar fortemente as quantidades, as grandezas, os locais de ocorrência, as características, a evolução e o significado das DP. Comumente, os enrolamentos de estator são o local com maior probabilidade de ocorrência de DP [87].

Caso exista um mecanismo predominante de deterioração em determinado enrolamento, o ensaio de DP pode, eventualmente, restringir a busca pelo local da deterioração, desde que se observe algumas das situações abaixo [58][77][87]:

- Se os pulsos positivos das DP são predominantes em relação aos negativos (por definição, isto é, as DP que acontecem principalmente no semiciclo negativo do sinal de CA), então é possível dizer que as DP estão ocorrendo na superfície do enrolamento (devido a bobinas frouxas ou defeituosas, caso estes defeitos existam);
- Se os pulsos negativos das DP são predominantes, então as DP possivelmente estão ocorrendo no isolante do fio de cobre (eventualmente por cavidades ou inclusões no verniz ou esmalte);
- Se não tem polaridade dominante, então as DP poderiam estar acontecendo na camada isolante de fundo de ranhura ou por delaminação do verniz;

Ensaio de DP em estatores de máquinas de alta tensão, novas ou recém instaladas, têm aplicabilidade de interesse como *checkpoint* de controle de qualidade na produção [87]. Entretanto, para enrolamentos aleatórios de baixa tensão, existem muitas dificuldades e observações que colocam em dúvida sua real utilidade.

Embora as normas IEC60270:2001 [82] e NBR6940:1981 [89] não incluam o tratamento de medição de DP em objetos com

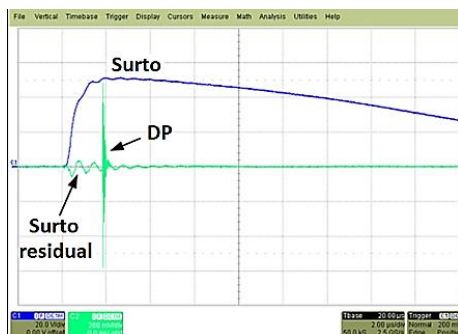
enrolamentos distribuídos, elas citam que as medições de descargas parciais em equipamento que possui enrolamentos, tais como transformadores geradores e motores, são dificultadas por fenômenos de atenuação e distorção dos pulsos ao longo dos enrolamentos, por fenômenos de ressonância e reflexões.

Como não existem métodos disponíveis para a avaliação direta da condição do isolamento entre espiras, para máquinas de baixa tensão, considera-se a possibilidade de utilização do ensaio de DP para detecção problemas, ainda em estágio inicial, evitando eventuais falhas [144] nos motores.

Em avaliações de isolamento em enrolamentos aleatórios de baixa tensão com ensaios de DP, pode acontecer que toda a diferença de potencial aplicada caia entre duas espiras vizinhas (uma que faça conexão com o menor potencial – terra – e outra com o maior potencial – fase) e o isolamento entre elas tenha que suportar tal tensão elétrica. Da mesma forma, é possível que o enrolamento esteja disposto de forma que exista apenas pequena diferença de potencial entre espiras adjacentes [1]. Neste caso, para excitar o enrolamento a produzir DP e avaliar o seu comportamento, precisar-se-ia de tensão muito elevada, capaz de impor valores superiores à PDIV em todo o enrolamento.

Surto rápido de tensão podem produzir DP, mesmo abaixo dos valores de PDIV (figura 30, p.78), como ilustrado na figura 47. A combinação de detecção de DP com ensaios de surto pode favorecer atividade de descargas para avaliação de isolamentos [69][144].

Figura 47 – Exemplo de surto aplicado e sinal de DP detectado em um ensaio de surto combinado com DP.



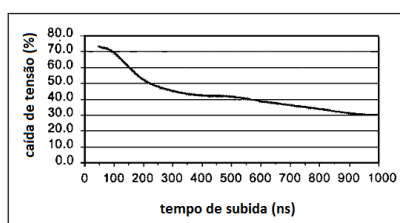
Fonte: Adaptado de [144].

Quando o estator é energizado com sinal senoidal, como aquele da rede de alimentação comercial, a tensão é uniformemente distribuída entre cada espira ao longo do enrolamento, desde o ponto de conexão da fase até o ponto de conexão com o neutro. No entanto, quando um pulso rápido é aplicado ao enrolamento do estator, a distribuição de tensão não é uniforme, com um percentual muito grande dela caindo nas primeiras espiras da bobina conectada diretamente ao terminal de fase [63]. Como as impedâncias indutivas em série dos enrolamentos são relativamente maiores que as impedâncias capacitivas para terra, devido às altas frequências envolvidas, a distribuição de tensão ocorre de modo não uniforme [1]. Consequentemente, a aplicação de surtos rápidos (tempos de subida da ordem de $0,2 \mu\text{s}$) nos enrolamentos de estatores pode fazer com que apenas o isolamento de algumas espiras, do início, esteja submetido aos maiores valores de tensão [145].

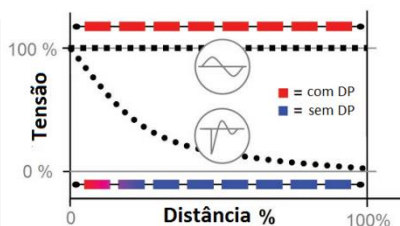
Na Figura 48(a) se apresenta a evolução do percentual de tensão a cair na primeira espira do enrolamento de um pequeno motor, em função do tempo de subida dos pulsos de alimentação, que variam desde 50 ns. Com o tempo de subida de 50 ns, os surtos de tensão aplicada entre os terminais caem 75% na primeira volta, resultando em um transiente de alta tensão que pode afetar a isolação das espiras vizinhas [110]. O comportamento da resposta mostra que quanto menor o tempo de subida, maior é a tensão a cair na primeira espira [145].

Na figura 48(b) é representado em vermelho a atividade de DP em cada elemento do enrolamento (considerado como uma série de 8 elementos); na parte superior alimentado por uma tensão senoidal e na parte inferior por um pulso.

Figura 48 – Queda de tensão na primeira espira de um motor com enrolamento aleatório e distribuição da tensão em enrolamento sujeito a teste de DP (PDIV) usando uma tensão senoidal de 50 Hz e um pulso.



(a) queda de tensão na primeira espira

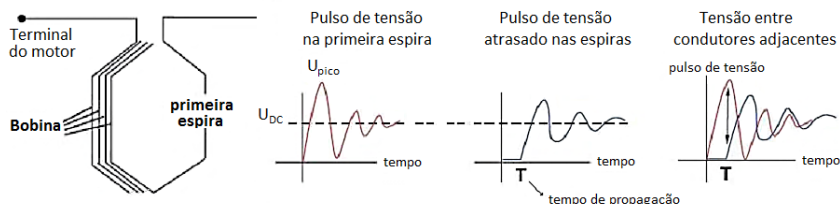


(b) distribuição de tensão no enrolamento

Fonte: Adaptado de [145] e [146].

Na figura 49 se ilustra uma bobina excitada por um pulso de tensão alta, a forma de onda resultante na primeira espira e em espiras subsequentes, assim como a diferença de potencial entre elas. Segundo a IEC 60270 a “probabilidade de ocorrer DP é maior no início da aplicação de tensão ou durante variações de tensão, sendo mais intermitentes enquanto a distribuição de tensão vai se tornando mais linear” (IEC 60270, 2001, p.28, tradução nossa) [82], indicando que para sinais de potência com baixos gradientes de tensão são menos prováveis de acontecer. Assim, em corrente contínua são mais difíceis de ocorrer as DP, como também mais difícil determinar as tensões de início de descarga *PDIV* e de extinção *PDEV*.

Figura 49 – Tensão entre espiras adjacentes em uma bobina devida a pulso de tensão aplicada.



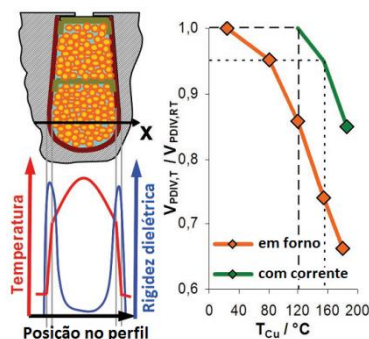
Fonte: Adaptado de [63].

Como mostrado na seção 3.3.3, a temperatura tem efeito na *PDIV* e portanto na atividade de DP: quanto maior a temperatura, menor a *PDIV*. Na figura 50 se ilustra a distribuição de temperatura no interior da ranhura de um estator, com enrolamento aleatório de cobre. Adicionalmente, representa-se a resposta de *PDIV* ao aumento da temperatura provocado pela ação de um forno e, também, devido ao efeito da circulação de corrente nos condutores [146]. A influência da temperatura no isolamento devida à condução de corrente é menor da que aquela associada ao aquecimento do enrolamento por meio de um forno. Isso é, a temperatura atingida por efeito Joule tem menor incidência na atividade de DP que teria a mesma temperatura atingida pela ação do entorno.

Para temperatura de 155 °C no enrolamento, a tensão *PDIV* foi reduzida em apenas 4%, em operação real; entretanto, para o forno foi reduzida a 76% da *PDIV* tomada a temperatura ambiente [146]. Os testes mostram que não existe diferença significativa na atividade de DP

entre um motor quente pelo serviço e frio [52]; embora o aquecimento externo favorece a atividade de DP.

Figura 50 – PDIV em função da temperatura na ranhura de estator.



Fonte: Adaptado de [146].

Apesar ser empregado algumas vezes para controle de qualidade de bobinas, barras ou enrolamentos de estatores, não é comum aplicar o teste de DP na indústria. Embora possa oferecer informações que permitem avaliar a condição e qualidade dos isolamentos, existem alguns problemas associados ao teste [87]:

Condicionamento: quando novos, os enrolamentos podem não estar completamente curados e, geralmente, não foram submetidos a tensão. Depois de um período de tempo, as DP das cavidades no isolamento do estator são menos intensas.

Falta de correlação com outros testes: alguns trabalhos têm sido feitos para analisar a correlação da atividade de DP em barras novas com outros testes sobre mesmas amostras. Atualmente, está em debate se a correlação existe, pois alguns trabalhos apresentam tal correlação em algumas instâncias e não em outras. A correlação pode ser afetada pela largura de banda da medição, atenuação e considerações de ruído.

Limites específicos: embora medições de DP em bobinas, barras ou enrolamentos, instalados em geradores e motores, possam dar informações da qualidade do isolamento, muitas variáveis, envolvidas em protocolos de teste e especificações, complicam o ajuste de limites para propósitos de controle da qualidade. Usuários desses ensaios requisitam informação de muitas questões como métodos de acoplamento e medição, características de instrumentação, teste de tensão, arranjos de conexão, temperaturas de teste, quantidades integradas, materiais isolantes (genéricos ou proprietários) e projeto de

máquinas. Devido às variações nos equipamentos de detecção de DP e aos sistemas de isolamento para alta tensão, qualquer especificação de controle da qualidade tem que ser desenvolvida de forma conjunta com o fabricante do enrolamento [87].

Para efeitos da análise da resposta por comparação, dada a natureza randômica do fenômeno das DP [88][99][108] (já mencionada na seção 3.3.11), e com o intuito de obter repetitividade aceitável, o teste de DP sempre teria que ser feito da mesma forma, com os mesmos equipamentos, nas mesmas condições ambientais, durante os mesmos períodos de teste, com máquinas e instrumentos de mesma especificação e projeto, e sobre grandes quantidades de enrolamentos (amostragem grande), acompanhados do julgamento de especialista [87][89][105].

3.6 CONSIDERAÇÕES DO CAPÍTULO

A ampla consulta à literatura técnica e científica, em grande parte relacionada nas seções anteriores, permitiu compreender o fenômeno das descargas parciais, revelando diversos aspectos à sua aplicação.

3.6.1 Conveniência do ensaio de descargas parciais

A avaliação de equipamentos por meio da análise de DP, particularmente em alta tensão, tem se mostrado útil para detectar defeitos que podem levar a falhas gerando expectativa favorável de aplicação na avaliação de sistemas de isolamento de baixa tensão.

Os estudos de Kaufhold em trechos de fios condutores trançados [122][123][142][143], relacionam probabilidade de atividade de DP com tensões a partir de 700 V. Portanto, ensaios de DP para estatores de baixa tensão poderiam ser feitos com tensões CA de teste na faixa de 700 V a 1200 V.

A atividade de DP pode-se estimular aumentando frequência, temperatura e reduzindo tempos de subida (isto é, aumentando estresse elétrico), empregando radiações ionizantes ou modificando os gases no entorno do enrolamentos do MIM sujeito ao ensaio (seção 3.3).

A análise dos resultados do ensaio de DP poderiam indicar defeitos, como fio muito próximo do núcleo de ferro e alteração na qualidade dos materiais isolantes, que poderiam conduzir a curto-circuito.

Estudos mostram que o teste de DP é não destrutivo, confiável, rápido e não representa risco para a qualidade de isolamentos (com níveis de tensão adequados) [1][82][109][121][122][143].

Não há risco de se provocarem perfurações no isolamento dos fios condutores com ensaio de surto de DP, desde que o teste seja parado quando a tensão aplicada atingir o valor da tensão de início (*PDIV*), o qual é menor que o valor da tensão de ruptura do isolamento. O ensaio de surto combinado com o teste de DP pode fornecer informações valiosas sobre a condição e o estado do isolamento [144].

A detecção das DP em linhas de transmissão de 20 kV CC, produzidas como consequência de árvores caídas sobre condutores [95], gera a expectativa de que tal análise possa servir de base para detectar defeitos de curto-circuito entre espiras, nos enrolamentos de um estator, pois pequenas alterações no isolamento alterariam a atividade de DP.

3.6.2 Dificuldades do ensaio de descargas parciais

Os estudos permitiram identificar, também, diversas dificuldades para a aplicação do ensaio de DP em enrolamentos de estatores de MIM. Os resultados disponíveis de pesquisas em baixa tensão foram obtidos, normalmente, em condições controladas de tensão, temperatura e umidade [124], as quais dificilmente podem ser reproduzidas em ambiente industrial, sujeito a influências diversas (acionamentos elétricos, ruídos na rede elétrica, variações de temperatura e umidade – durante um dia e no decorrer do ano). Portanto, não se tem garantias da qualidade de resultados obtidos sob as fortes condições impostas pelo processo industrial, que exige robustez nos sistemas empregados.

Os ensaios de DP são usualmente conduzidos para equipamentos e máquinas de alta tensão e ainda não existem normas ou padrões específicos para aplicação do teste em baixa tensão. A IEC 61934:2006 pode ser estendida para tais dispositivos, entretanto, é mais focada na normatização, visando assegurar a robustez de isolamentos de equipamentos alimentados por inversores de frequência PWM.

O escopo das normas vigentes sobre medição de DP não compreende o tratamento de objetos com elementos de parâmetros distribuídos, como o caso dos enrolamentos aleatórios, que apresentam fenômenos complexos de acoplamento capacitivo e indutivo [82][89] especialmente na região das cabeças dos enrolamentos. No entanto, os circuitos de medição descritos por elas podem ser usados para detecção das DP em esse tipo de objetos.

O tipo de enrolamento (aleatório), posições espaciais de cada espira e particularmente das primeiras, natureza da DP (interna, superficial ou corona) e a variabilidade do processo de manufatura (materiais condutores e isolantes, dimensões, folgas, montagem) dificultariam a repetibilidade do processo, inviabilizando a aplicação do teste em uma linha de produção.

Avaliações com tensões de frequências altas têm o inconveniente de que a maior parte vai cair nas primeiras espiras, limitando o teste apenas para uma pequena parte do enrolamento. Ainda, se o ensaio de DP fosse feito nos dois sentidos do enrolamento (virando as pontas de teste), a maior parte do enrolamento ficaria sem avaliar.

Embora o potencial do uso do teste de surto de DP, para avaliação do estado de isolamentos, tenha sido alvo de investigação neste trabalho, existem inúmeras questões práticas que precisam ser resolvidas e requisitos de medição e interpretação dos sinais a serem tratados, antes de sua aplicação em laboratório e, logo depois, em chão de fábrica. É importante definir uma forma de realizar as medições e extrair os indicadores de DP relacionados, de modo confiável e sistemático [144]. Uma vez definido o procedimento de medição, os métodos para interpretação das medições ao longo do tempo e entre máquinas e enrolamentos, faz-se necessária a intervenção de especialista para a análise correta da informação obtida, visando a detecção e predição de falhas no isolamento [144].

Por fim, considerada, eventualmente, como adequada a avaliação do sistema de isolamento por teste de DP, precisar-se-á de equipamento especializado para detecção dos fracos sinais obtidos com fontes de baixa tensão, pouco perceptíveis em meio ao ruído ou dissipáveis pelo amortecimento produzido nos próprios condutores dos enrolamentos. Adicionalmente é válido salientar que todo equipamento a ser empregado nos circuitos de alimentação e detecção deverá operar livre de DP.

Ante as dificuldades consideradas do ensaio de DP, a partir do estudo teórico do fenômeno e das condições que intervêm nele, para aplicá-lo de forma que pudesse auxiliar aos já existentes para controle da qualidade na produção de estatores, contempla-se no capítulo seguinte a avaliação e aplicação experimental do ensaio de rotor bloqueado (a uma amostra de estatores considerados bons), visando seu emprego na detecção de não conformidades de produto e reduzir a probabilidade de que peças com defeitos, com potencial de evoluir em falha, possam chegar ao cliente.

4 ENSAIO DE ROTOR BLOQUEADO

Como visto anteriormente nas tabelas 5 (p. 60) e 6 (p. 61), o ensaio de rotor bloqueado (ERB) é uma das ferramentas tipicamente empregadas para obtenção de características de desempenho de motores. Segundo a ABNT NBR 5383-2:2007 [81], tal procedimento, aplicado a motores de indução monofásicos, é realizado para a determinação de corrente, do conjugado e, quando necessário, da potência elétrica, com o rotor bloqueado e os enrolamentos de estator energizados.

O ensaio de rotor bloqueado (ERB), como complemento aos testes de controle da qualidade comumente aplicados, objetiva a avaliação do estator em uma condição que emule àquela que poderia ter em serviço, uma vez integrado como parte do MIM na linha de produção de compressores, antes mesmo do seu fechamento hermético.

Nas linhas de produção de estatores, a avaliação do produto é sempre feita por meio de pelo menos quatro ensaios – nessa ordem: ensaio de resistência, ensaio de alta tensão, ensaio de surto e sentido de rotação – [71], que desconsideram os efeitos do rotor acoplado.

O ERB, avaliaria o estator conformando um MIM, mas precisa do acoplamento mecânico adequado de um rotor padrão, em cada teste, que permita fornecer medições de interesse comparáveis. Portanto, uma bancada de ERB deverá disponibilizar os meios tanto mecânicos quanto elétricos, para testar cada estator comparável, segura e confiavelmente.

Por meio da análise dos valores do conjugado e da corrente de uma amostra de estatores, considerados bons, com um rotor de teste acoplado e travado mecanicamente, avaliar-se-á o potencial do ERB, através de uma bancada concebida, projetada e construída para tal fim, visando sua possível aplicação como controle de qualidade na produção de estatores de MIM. As alterações na resposta típica de conjugado e corrente, indicariam anomalias nas características do estator, como: enrolamento incorreto; diâmetro de fio trocado; material de fio inadequado; lâmina com aço não adequado; curto-circuito entre espiras, bobinas de uma mesma fase ou fases distintas; entre outras [71].

4.1 CARACTERÍSTICAS DO ENSAIO DE ROTOR BLOQUEADO PARA O MOTOR DE INDUÇÃO MONOFÁSICO

Esse ensaio, conduzido como o estator energizado à frequência nominal e com o rotor travado mecanicamente, envolve esforços

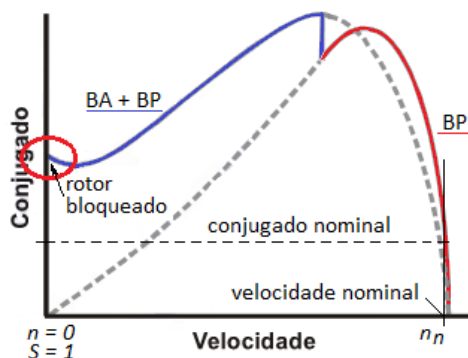
mecânicos e taxas de aquecimento elevados. Por isto, deve-se observar que [45][81]:

- o meio mecânico de bloqueio do rotor tenha rigidez adequada para evitar acidentes pessoais ou danos ao equipamento;
- o sentido de rotação seja estabelecido antes do ensaio;
- o motor esteja aproximadamente à temperatura ambiente antes do início do ensaio (não devendo ser inferior a 0 °C nem superior a 40 °C);
- as leituras de corrente e conjugado sejam tomadas tão rápido quanto possível, logo após iniciado o ensaio de rotor bloqueado (ERB);
- o ERB seja realizado em menos de 5 s e a temperatura fique sob o limite da classe térmica do isolamento mais 40 °C.

O MIM parado só desenvolve conjugado de forma autônoma quando ambos os enrolamentos, principal (BP) e auxiliar (BA), estão em condição de partida, isto é, em paralelo e energizados (conforme visto na seção 2.5). Assim, a aplicação do ERB fica sujeito às condições de partida, restringindo as medições de conjugado e corrente ao ponto de operação de máximo escorregamento (velocidade nula), o qual é denominado ponto de rotor bloqueado, indicado na curva de conjugado *versus* velocidade da figura 51.

Como o enrolamento BA é projetado para impor impedância maior apenas no curto intervalo de tempo de partida (seção 2.5.1), ele é constituído de fio mais fino que o enrolamento BP. Portanto, manter o BA continuamente ligado, pode causar sobreaquecimento do MIM.

Figura 51 – Ponto do ensaio de rotor bloqueado (ERB) na curva conjugado *versus* velocidade do MIM.



Fonte: Adaptado de [81].

4.1.1 Conjugado com rotor bloqueado

Após a partida, o conjugado T_s no eixo do MIM pode ser geralmente determinado pela relação de potência e velocidade, conforme a equação 24 [31],

$$T_s = \frac{P_{saída}}{\omega_r} = \frac{P_{saída}}{(1-s)\omega_s}, \quad (24)$$

onde: $P_{saída}$ é a potência do motor;

S é o escorregamento;

ω_r é a velocidade do eixo;

ω_s é a velocidade síncrona.

Porém, essa expressão não é válida durante o transitório de partida (intervalo do tempo para atingir a velocidade nominal de operação, a partir do motor parado).

Conforme Veinott [41], o conjugado de partida ou de rotor bloqueado (T_{st}) para um MIM pode ser obtido por meio da equação 25,

$$T_{st} = \frac{15,93p}{f} K r'_r I_{BP} I_{BA} \sin(\theta_{IBP} - \theta_{IBA}) \text{ [Nm]}, \quad (25)$$

onde: p é o número de polos;

f é a frequência em hertz;

r'_r é a resistência da gaiola do rotor refletida ao estator (resistência aparente de rotor);

I_{BP} é a corrente do enrolamento principal;

I_{BA} é a corrente do enrolamento auxiliar;

$(\theta_{IBP} - \theta_{IBA})$ é a diferença de fase entre as correntes dos enrolamentos principal e auxiliar;

K é uma constante do motor com base na relação de espiras entre BA e BP.

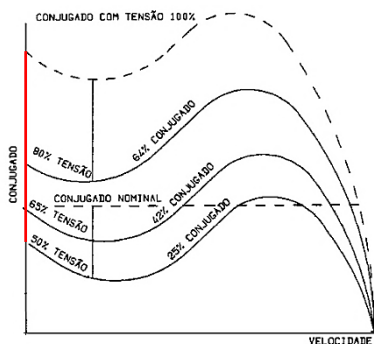
Parâmetros definidos no projeto do MIM, como: número de polos; número de espiras; relação de espiras entre BA e BP; tipo de enrolamento; materiais dos condutores; propriedades magnéticas do aço; tipo de partida (uso de capacitores); geometria e dimensões, determinam as características de impedância dos enrolamentos e em consequência, a fase e a amplitude da correntes envolvidas [31][41].

4.1.2 Variação da resposta com a tensão de ensaio

O ERB deve ser realizado tão próximo quanto possível das condições nominais de alimentação, mas, se for utilizada tensão reduzida, o conjugado do motor deve ser corrigido para a tensão especificada [81], como também a corrente medida. A norma ABNT NBR 5383-2 recomenda que, em uma primeira aproximação, a corrente seja corrigida como se variasse diretamente com a tensão, e o conjugado com o quadrado da tensão [81].

O efeito da diminuição da tensão de alimentação na curva característica conjugado *versus* velocidade é ilustrado na figura 52, onde a variação do conjugado é proporcional ao quadrado da variação da tensão de alimentação para quatro percentuais. Considerando-se, por exemplo, a realização de ERB a tensão reduzida em 45% para um MIM de 220 V nominais (isto é, alimentado com 99 V), obter-se-iam valores de conjugado e corrente próximos a 20% e 45% respectivamente, dos valores esperados em condições nominais de alimentação.

Figura 52 – Curvas de conjugado *versus* velocidade para vários percentuais de tensão nominal.



Fonte: Adaptado de [24].

4.1.3 Variação da resposta com a posição do rotor

Como a geometria do motor não é completamente homogênea, o campo magnético no entreferro também não é homogêneo. A variação na posição angular relativa do rotor (em relação ao estator) pode resultar em alterações nos valores de conjugado. Tal efeito pode ser decorrente de aspectos construtivos do motor, dentre eles: distribuição de espiras;

tipo e disposição de enrolamento [16]; geometria do entreferro, ranhuras e dentes de estator [21]; número das barras de rotor e grau de inclinação (*skew*) delas. A variação do campo magnético no entreferro vai produzir uma variação no conjugado de rotor bloqueado dependente da posição. Conforme a norma NBR 5383-2,

O conjugado com rotor bloqueado é o conjugado mínimo desenvolvido, em todas as posições angulares do rotor com o eixo bloqueado. O conjugado pode ser medido com uma corda e polia, ou com um freio ou com um dispositivo que funcione como freio (ABNT NBR 5383-2, 2007, p. 23) [81].

Para analisar a resposta do conjugado de partida do MIM com relação à posição angular relativa do rotor por meio da “curva de rotor bloqueado em 360°”, isto é, o conjugado em função da posição para um giro completo do eixo, dispõem-se de dois ensaios [21], conhecidos como de eixo de torção e de bloqueado ponto a ponto. Tais procedimentos permitem avaliar efeitos das harmônicas e identificar problemas no motor como excentricidade e defeitos no rotor, assuntos que não serão abordados neste trabalho.

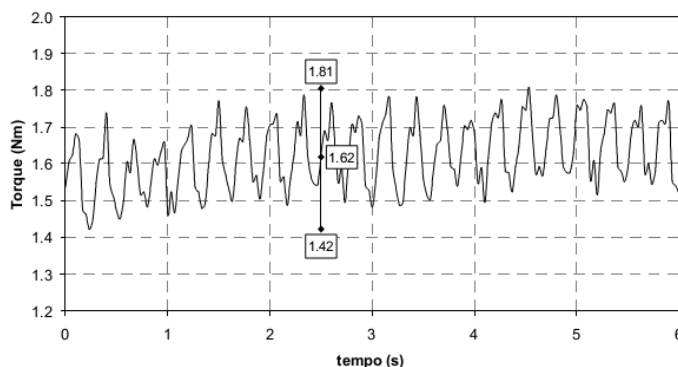
4.1.3.1 Eixo de torção ou rotação imposta

É o método mais utilizado para avaliar a variação do conjugado. Nesse ensaio, o motor energizado é acoplado a um sistema tipo dinamômetro elétrico para controle da carga mecânica imposta ao eixo, conformado por um motor de maior potência acionado por um inversor de frequência, que impõe uma rotação fixa de baixa velocidade, ao motor em teste, de modo que ele opere em uma condição de quase-bloqueado [21].

A figura 53 ilustra a resposta em curva de rotor bloqueado, do conjugado de um MIM, submetido a teste de rotação imposta com velocidade de 5/60 Hz, obtida para meio giro do eixo, indicando os valores máximo e mínimo do conjugado para os seis segundos do teste.

As leituras para um giro completo de conjugado, corrente e potência são registrados por um sistema de aquisição de dados, em função do tempo, e, por meio de um software dedicado, logo depois podem ser convertidas e referenciadas em função de graus espaciais (ângulo mecânico).

Figura 53 – Curva de rotor bloqueado para um MIM em ensaio com rotação imposta de 5/60 Hz (5 rpm) para meio giro do eixo.



Fonte: [21].

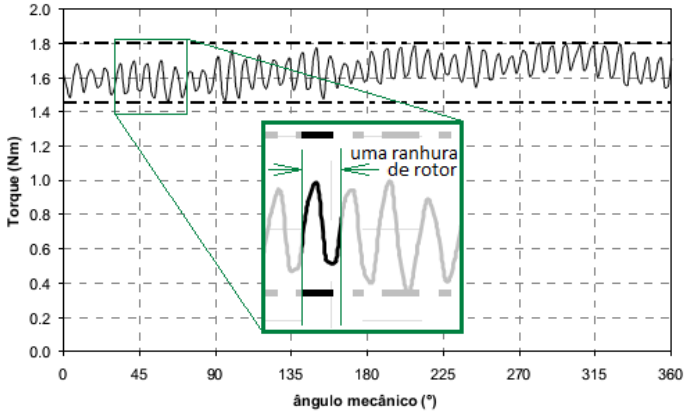
4.1.3.2 Bloqueado ponto a ponto

Este ensaio é realizado com o auxílio de um dispositivo mecânico acoplado ao eixo de um dinamômetro. Tal dispositivo sustenta o motor e permite que sua carcaça gire, enquanto o rotor permanece fixado no dinamômetro. A leitura dos valores da curva de conjugado é feita em função da posição angular. Para cada incremento de ângulo são medidos e registrados o deslocamento angular, o conjugado, a corrente e a temperatura do rotor [21].

Na figura 54 se ilustra o resultado de um ensaio com rotor bloqueado ponto a ponto em função da posição angular do eixo, para um giro completo, de um MIM de 44 barras no rotor e 36 ranhuras de estator. A amplitude da curva plotada do sinal do conjugado de rotor bloqueado, oscila periodicamente em faixa bem definida, com frequência dependente do número de ranhuras de rotor (ver detalhe na ampliação). O valor médio do sinal apresenta também uma variação como consequência de alterações no entreferro, repetindo-se esse efeito em cada volta completa do eixo.

Quando se busca obter uma resposta adequada do comportamento da variação do conjugado, “o número de pontos de ensaio cresce com o número de ranhuras no rotor para garantir a variação do torque no passo de uma ranhura” (RUTHES, 2008, p. 51) [21]. Isto é, o número de pontos de travamento para realização da leitura de conjugado, depende do número de barras condutoras do rotor (ou ranhuras), onde mais barras demandam mais pontos de medição.

Figura 54 – Curva de rotor bloqueado em 360° para um MIM com capacitor permanente (PSC).



Fonte: Adaptado de [21].

4.1.4 Variação da resposta com a temperatura

Por efeito Joule, a circulação de corrente elétrica (I) através dos condutores de estator, com resistência (R_S), gera dissipação de potência em forma de calor. A potência Joule (P_J) dissipada pelos enrolamentos, considerada como perda, pode ser estimada pela equação 26,

$$P_J = R_S I^2 \quad (26)$$

Sabe-se que nos metais puros como efeito da elevação da temperatura, aumenta o valor da resistividade e como resultado aumenta também a resistência elétrica [13]. A circulação de corrente pelos condutores do estator provoca aumento da temperatura e, em consequência, aumento do valor da resistência ôhmica, até que o regime de operação contínua seja atingido. Assim, a relação entre a temperatura do enrolamento de estator ($Temp_S$) do motor e a resistência elétrica (R_S) do mesmo, pode ser estimada a partir da equação 27,

$$Temp_S = \frac{R_S - R_{S0}}{\alpha_0 R_{S0}} + Temp_{S0} \quad (27)$$

onde: $Temp_{S0}$ é a temperatura de referência (inicial);
 R_S é a resistência elétrica do condutor;

R_{S0} é a resistência do enrolamento à essa temperatura de referência;

α_0 é o coeficiente de temperatura da resistividade do condutor, que indica a variação da resistividade por grau de temperatura.

Nominalmente, para o cobre (pureza de 99,9%) $\alpha = 0,0039 \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$, ou seja, a resistividade aumenta de 0,39% para cada acréscimo de $1 \text{ } ^\circ\text{C}$ numa temperatura próxima a $20 \text{ } ^\circ\text{C}$ [13]. Para o alumínio (pureza de 99,5%) a $20 \text{ } ^\circ\text{C}$, α tem um valor próximo ao do cobre.

Conforme a equação 27, a resistência permite avaliar a temperatura do enrolamento do estator. Além disso, conforme a lei de Ohm ($V = RI$), alterações na resistência de condutores (R) ligados a uma fonte de tensão constante (V) implicam variações na corrente (I) que circula pelos mesmos. Do mesmo modo, conforme a lei de Ampère [11], alterações na intensidade de corrente produzem variações no campo magnético. Portanto, corrente e conjugado são susceptíveis à variações da temperatura e a magnitude de tal alteração, determina a necessidade de considerar seus efeitos no estator com o rotor acoplado.

Algumas considerações sobre a aplicação do ERB a estatores de MIM, quanto às grandezas a avaliar e ao potencial e utilidade do ensaio, serão relacionadas na seção seguinte.

4.2 CONSIDERAÇÕES PARA REALIZAR O ENSAIO DE ROTOR BLOQUEADO

Visando a aplicação do ERB na detecção de defeitos em estatores de MIM, convencionou-se avaliar os resultados com base nos eventuais desvios observados em relação às respostas de conjugado e corrente de amostra de peças consideradas boas.

As leituras de conjugado e corrente obtidas do ERB são dependentes de diversos fatores, dentre eles: o projeto do MIM; variabilidade do processo de fabricação; montagem; características elétricas de alimentação, e meio ambiente. No entanto, com o intuito de aplicar o ERB para avaliar estatores, todos os demais elementos e parâmetros devem ser mantidos constantes, comuns a todos os ensaios, visando garantir padronização dos resultados. Dentre esses elementos, destacam-se:

- um rotor comum de teste, travado mecanicamente, para obter a resposta de todos os ensaios;
- posição relativa do rotor em relação ao estator constante;
- tensão de alimentação e de fontes auxiliares constantes;

- frequência de alimentação constante;
- sensores e condicionadores comuns a todos os ensaios;
- instrumentação para medição comum para todos os ensaios.

As medições a serem registradas, para realizar a análise da resposta do ERB e verificar os efeitos do aquecimento dos enrolamentos, são as seguintes:

- medição de corrente alternada;
- medição do conjugado;
- medição da temperatura ambiente próxima ao enrolamento antes e depois de cada ensaio;
- medição da resistência do enrolamento antes e depois do ensaio.

Como visto na seção 2.5.3 (p. 48), o conjugado de rotor bloqueado é proporcional ao produto de três fatores principais: seno do ângulo de deslocamento entre as correntes de BP e BA; produto das correntes de BP e BA; o número de espiras de BA [31]. Assim, a variação de algum desses poderá alterar a resposta do conjugado.

4.2.1 Possibilidades na detecção de defeitos

O ERB será utilizado tanto para a obtenção do “estator padrão” quanto para a avaliação de outros estatores produzidos. Em todos os casos, obter-se-ão as respostas de corrente e conjugado com rotor de teste, em bancada específica, pois o processo atual não permite conhecer quais pares de peças – estator e rotor – irão compor o motor, posteriormente.

O ERB atuaria de maneira complementar aos ensaios de rotina feitos nas linhas produtivas por meio de painéis de testes elétricos para estatores de motores de indução.

Troca de materiais de condutores e de núcleo, erros de conexão, inversão de giro e estatores trocados, além de defeitos no isolamento, como: curto-circuito entre espiras; curto entre espiras e núcleo (pacote); perfuração no isolamento; são irregularidades que poderiam ser detectados por meio da resposta do ERB, pois mudariam as propriedades indutivas e magnéticas do estator, alterando a corrente e o conjugado medidos em relação ao modelo padrão previamente obtido. Embora os ensaios empregados atualmente nas linhas de produção tenham como propósito detectar esses defeitos, o ajuste dos limites dos critérios de aceitação pode dificultar a correta indicação desses desvios [71] possibilitando erros de inspeção.

4.2.2 Dificuldades na detecção de defeitos

As variações no processo construtivo dos estatores dificultam a detecção de defeitos por meio dos ensaios tipicamente empregados. Tais variações, muitas vezes, acabam interferindo na avaliação do defeito, por demandarem a consideração de tolerância nos testes, a fim de evitar que estatores contendo apenas variações de processo não sejam confundidos com peças defeituosas [58]. Algumas destas variações de processo que podem produzir enganos na detecção de defeitos podem ser acarretadas por situações como:

- imperfeições no processo de trefilação dos condutores, que podem resultar em alteração da bitola dos mesmos [58];
- desgaste das ferramentas do processo de estampagem que pode resultar em alterações das dimensões físicas das chapas, variando o entreferro [68];
- mau funcionamento das bobinadeiras, que podem causar diferenças no número de espiras e em seus comprimentos;
- variações nas dimensões das chapas do estator podem causar diferenças na altura e comprimento do pacote de chapas [58];
- variabilidade da composição das chapas de aço (ligas de ferro e carbono), e do processo de estampagem (temperatura, pressão e, ainda, manuseio das lâminas), podem ocasionar variações nas suas propriedades magnéticas (curvas de indução magnética \mathbf{B} pela intensidade de campo magnético \mathbf{H} : $\mathbf{B} \times \mathbf{H}$) [68];

Até mesmo variações nos processos de grampeamento dos estatores podem acarretar alterações nas curvas $\mathbf{B} \times \mathbf{H}$, que por sua vez causam aumento das perdas e alteração no campo coercitivo, interferindo nas avaliações de curto-circuito [58][69]. Porém, bobinas em curto-circuito podem alterar mais a permeabilidade da chapa do que as perdas do núcleo do estator [58].

Quanto às medições, conforme o trabalho de Scavenius [11], qualquer variação durante o ensaio tem um efeito mais evidente no ERB (quando a velocidade é zero), levando a desvios grandes nos valores calculados e medidos.

Outra dificuldade inerente ao ERB com um rotor de teste, é o acoplamento mecânico com o estator sob avaliação, pois divergências no alinhamento ou excentricidade, que mudam a geometria do entreferro, podem produzir respostas diferentes no conjugado. Como

visto, o conjugado no ERB vai depender da posição relativa do rotor em relação ao estator.

Para minimizar o risco de falsas decisões, frente aos defeitos e à variabilidade do processo, é importante garantir adequada caracterização prévia do padrão e verificar que é proveniente de amostra homogênea e representativa do processo. Entretanto, a medição de conjugado e corrente no ERB, tanto para a amostra que definirá o padrão de comparação como para avaliação de estatores, só é possível por meio do uso de uma bancada que suporte mecanicamente o rotor de teste e os estatores, e possibilite a medição das grandezas de interesse.

4.3 BANCADA PROTÓTIPO PARA ENSAIO DE ROTOR BLOQUEADO

Um dos objetivos deste trabalho é a avaliação do ERB como um ensaio complementar aos realizados pelos painéis de testes elétricos para estatores de MIM nas linhas de produção de compressores herméticos, visando evitar que peças defeituosas cheguem aos clientes. Para tanto, foi necessário projetar, desenvolver e testar uma bancada de ensaios; aplicável a MIM com fase auxiliar de partida, de 220 V CA e 60 Hz, identificados pela empresa parceira como sendo de modelo EM.

4.3.1 Caracterização da amostra padrão

Além de ser um modelo representativo da linha de produção do fabricante, o estator objeto do estudo foi eleito devido a outros fatores, dentre eles: disponibilidade; potência; torque; tensão de alimentação; tamanho.

As características da amostra padrão, assim denominada por reunir 20 estatores considerados bons pelo fabricante, estão indicadas nas especificações do MIM da tabela 9. Cada uma das peças foi identificada e catalogada pelo número de série e marcada aleatoriamente de EM101 até EM120. Na figura 55 se apresentam duas peças dessa amostra padrão empregada para obter os sinais de referência do ERB, visando a avaliação de estatores de mesmo modelo.

Para avaliar a uniformidade da amostra, considerou-se apropriado fazer a medição da resistência ôhmica a quatro fios, como também, a de indutância, de forma individual para os enrolamentos principais e auxiliares das vinte peças.

Tabela 9 – Especificações do MIM associado a compressor hermético indicando caraterísticas do estator da amostra.

| EMYe 70HEP (220-240) V / (50-60) Hz | | |
|--|----------------------------------|--|
| Tensão de alimentação | 220 V | monofásico, corrente alternada |
| Frequência | 60 Hz | |
| Potência nominal | 140 W | aproximadamente 1/5 de HP |
| Corrente de rotor bloqueado LRA – <i>Locked Rotor Amperes</i> | 7,3 A | valor nominal de pico da corrente para o enrolamento principal |
| Número de pares de polos | 1 | no enrolamento principal |
| Tipo de partida | RSIR (ISR) | <i>Resistive Start – Inductive Run</i> |
| Classificação do isolamento | H (180 °C) | |
| Temperatura de bobina | 130 °C máx. | valor máximo |
| Enrolamento principal BP | 13,32 $\Omega \pm 5\%$ | bitola condutor 0,60 mm em cobre |
| Enrolamento auxiliar BA | 19,93 $\Omega \pm 5\%$ | bitola condutor 0,38 mm em cobre |
| Aplicações do motor | LST – <i>Low Starting Torque</i> | aplicações LBP (<i>Low Back Pressure</i>) como congeladores e refrigeradores |
| Equipamento de partida | Relé PTC | PTC – <i>Positive Temperature Coefficient</i> , comuta o BA |
| Capacidade frigorífica do compressor associado | 173 W (685 Btu/h) | temp. de evaporação = -23,3 °C compressor com R134a |
| Número de ranhuras | 24 no estator | |
| Rotor | EM (28 barras) | 21332.2014 (usado como rotor de teste) |

Fonte: Adaptado de [147] e [148].

Figura 55 – Dois estatores da amostra para o ERB.

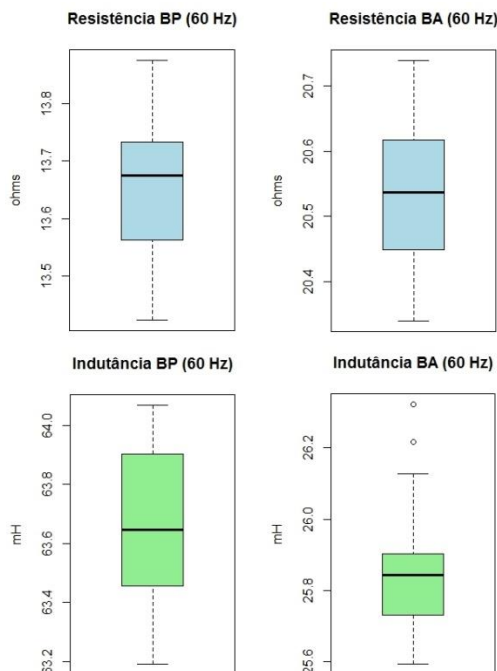


Fonte: Autor.

Na figura 56 estão representados, por meio de diagramas de caixa (*boxplot*), os resultados de medição das variáveis resistência (R) e indutância (L) dos enrolamentos, principal (BP) e auxiliar (BA), dos estatores da amostra. Os valores foram obtidos por meio de um analisador de impedância LCR Agilent 4294A [149], considerando frequência de 60 Hz, com incertezas associadas nessa frequência de 1,00% para indutância e 0,08% para resistência, dos valores lidos.

A maior variação nas leituras tomadas se apresenta para a indutância do enrolamento auxiliar, a qual ainda com dois *outliers* como valores atípicos da amostra (EM106 e EM115). O desvio destes *outliers* é inferior a 2% e julgou-se apenas como efeito da variabilidade do processo. A variação observada pode ser decorrente da susceptibilidade dos fios condutores empregados (0,38 mm) aos esforços mecânicos de bobinagem, alterando a geometria do enrolamento. Tal efeito é mais pronunciado nos enrolamentos auxiliares que são constituídos de condutores mais finos que os do enrolamento principal. Além disso, infelizmente, as variações ambientais na sala de medição não foram controladas possibilitando algum grau de influência nas leituras dos parâmetros medidos. Entretanto, com base nos resultados obtidos, considerou-se que a amostra é homogênea e apropriada para a caracterização do padrão de comparação.

Figura 56 – Resultado da medição de resistência e indutância dos enrolamentos da amostra.

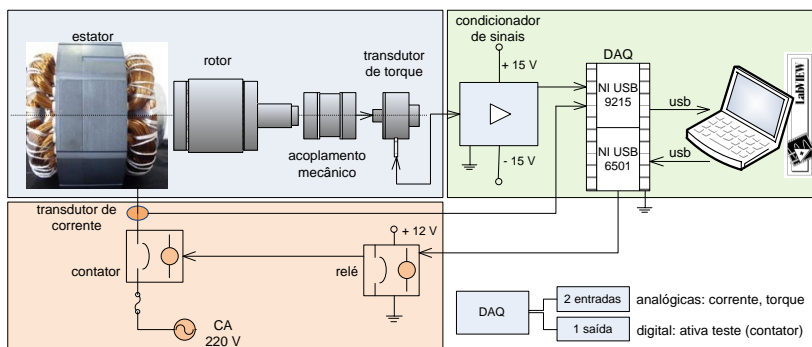


Fonte: Autor.

4.3.2 Instrumentação do sistema de medição da bancada protótipo para ensaio de rotor bloqueado (BPERB)

Os primeiros testes de RB foram realizados empregando bancada inicial com configuração representada no diagrama de blocos da figura 57, onde se destacam: estrutura mecânica e monitoramento do conjugado; condicionamento, aquisição e tratamento de sinais; acionamento elétrico e monitoramento de corrente. Os sinais dos transdutores de conjugado e corrente têm que ser amplificados e condicionados para sua conversão digital no sistema de aquisição de dados, para depois serem processados em um programa desenvolvido especificamente para a bancada, por meio do software de projeto gráfico de sistemas LabVIEW, da National Instruments [150].

Figura 57 – Diagrama de blocos do sistema inicial de medição da bancada.



Fonte: Autor.

4.3.2.1 Projeto mecânico e medição de conjugado

O tipo de ensaio e as características de conjugado máximo de rotor bloqueado (RB), desenvolvido a partir da alimentação do estator em estudo em condições nominais, demandaram a aplicação de transdutor de torque capaz de operar na faixa de medição de 0 a 0,7 Nm, observadas as características de erro e operação adequadas (tabela 10).

De acordo com o formato mecânico da bancada inicial e a disponibilidade de sensores no mercado, optou-se pelo transdutor de conjugado de reação QWFK-8M TD, do fabricante Honeywell. Tal dispositivo, com especificações indicadas na tabela 10, consiste basicamente de uma ponte completa de extensômetros (*strain gages*), montados em um eixo de torção, que fornece sinal de tensão

proporcional ao conjugado, determinado pela deformação do material quando submetido a tensão mecânica, e características e disposição dos extensômetros. Em relação às técnicas de medição de conjugado focado em motores elétricos, o trabalho de Souza [151] apresenta um desenvolvimento conciso dos princípios físicos aplicados comumente.

Tabela 10 – Especificações do transdutor de torque.

| QWFK-8M TD SENSOTEC (HONEYWELL) | | |
|---------------------------------|------------------|------------------|
| Extensômetros | ponte completa | 4 x 350 Ω |
| Sensibilidade | | 2 mV/V |
| Linearidade | | $\pm 0,1$ % FM |
| Histerese | | $\pm 0,1$ % FM |
| Não repetibilidade | | $\pm 0,03$ % FM |
| Faixa medição | (0 a 100) in.oz | (0 a 0,706) Nm |
| Faixa temperatura | (-65 a + 225) °F | (-53 a +107) °C |
| Deflexão torcional | 0,00225 rad | 0,1461° |
| Resolução | | analógico |



Fonte: [152].

O projeto mecânico da BPERB, que suporta tanto o transdutor de conjugado (torquímetro) como o estator acoplado ao rotor de teste, foi modificado varias vezes, como mostrado na figura 58, procurando otimizar a reprodutibilidade dos testes realizados, pois pequenas folgas produzem variações importantes na posição relativa entre rotor e estator. Além disso, o projeto mecânico também determina os níveis de vibração eletromagnética que atingem ao torquímetro durante o teste, o qual pode traduzir a leitura do conjugado de maneira ruidosa ou erradas.

4.3.2.2 Medição de corrente e acionamento elétrico

O mercado dispõe de diferentes transdutores que podem ser aplicados à medição da corrente alternada dentre eles: resistor shunt; transformador de corrente; bobina de Rogowski [113]; transdutores de efeito Hall [80]. Considerou-se a vantagem da segurança oferecida pela isolamento dos transdutores de efeito Hall, além de sua resposta dinâmica apropriada para a aplicação, e, desse modo, foi selecionado o LA 25-NP, do fabricante LEM [153]. As características principais desse transdutor são apresentadas na tabela 11. A corrente nominal primária é configurável até 25 A em CC ou CA, nas faixas de medição de (5, 6, 8, 12 e 25) A, tendo sido ajustado para operar na faixa de 12 A, onde a relação de transformação é 2:1000 (com duas espiras de primário), ou seja, para cada 2 A de corrente na entrada é fornecido 4 mA na saída.

Figura 58 – Evolução do projeto mecânico da BPERB.



Fonte: Autor.

Tabela 11 – Especificações do transdutor de corrente de efeito Hall.

| LA 25-NP – LEM | |
|---------------------------|---------------------|
| Corrente prim. nominal | 25 A |
| Corrente prim. medição | (-36 a +36) A |
| Erro máximo | ± 0,5% |
| Não linearidade | < 0,2%. |
| Offset | ± 0,15 mA máx. |
| Resposta dinâmica | 0 kHz – 150 kHz |
| Temperatura de operação | 100 MΩ |
| Resistência de isolamento | > 1500 MΩ |
| Faixas de medição | (5, 6, 8, 12, 25) A |
| Tensão de alimentação | (-15 e +15) V |



Fonte: [153].

Para comutar a alimentação do estator durante os ensaios, foi empregado, inicialmente, um contator eletromecânico de três polos

WEG CW07-10E, acionado mediante um relé de 12 V ativado pelos sinais digitais de controle do sistema de aquisição de dados. O tempo de operação do contator é de 100 ms (máximo) e o tempo do relé de 10 ms (típico), segundo especificações dos fabricantes.

Para diminuir no contator o tempo entre o sinal de ativação e o contato efetivo, foi considerado o emprego de um dispositivo de estado sólido, com capacidade de chaveamento adequada à alimentação do estator e com tempo de ativação e desativação menor que um ciclo de rede (60 Hz). Optou-se pelo relé GEFRAQ GQ-25-48-D1 [154], cujas especificações (tabela 12) superam os requisitos da aplicação e melhoram as características de repetibilidade, possibilitando a alimentação das bobinas no cruzamento por zero da tensão.

Além da alimentação do estator em condição de partida, BA e BP em paralelo, foi considerada a possibilidade de controlar de forma independente o tempo de acionamento do enrolamento auxiliar, possibilitando testes de partida do motor e avaliação de forma independente, da corrente do BP e do alinhamento com o rotor girando. Para tanto, foi empregado o contato normalmente fechado (NF) de um relé de 12 V, que permite retirar BA do circuito a partir de um comando determinado pelo sistema de controle do teste.

Tabela 12 – Especificações do relé de estado sólido.

| GEFRAN GQ-25-48-D1-1 | |
|--------------------------------|--|
| Frequência | (45 a 65) Hz |
| Tempo de ativação | $\leq \frac{1}{2}$ ciclo da rede |
| Tempo de desativação | $\leq \frac{1}{2}$ ciclo da rede |
| Tensão nominal | (48 a 480) V, CA |
| Corrente nominal (ver nota) | 5 A, CA rms (AC53a) 25 A, CA rms (AC51) |
| Sobrecorrente repet. | 60 A máx. rms ($t = 1$ s) |
| Tensão de controle | (3 a 32) V, CC |
| Isolamento galvânico | 4000 V, CA rms (E/S) |



Fonte: [154].

Nota: capacidade de corrente AC53a para carga indutiva, tipo motor (IEC 60947-4-2) e AC51 para carga tipo resistiva (IEC 60947-4-3).

4.3.2.3 Condicionamento e aquisição de sinais

A adequação do sinal de saída do transdutor de conjugado aos níveis de operação do conversor analógico digital (ADC – *Analogic to Digital Converter*) do sistema de aquisição de dados (DAQ – *Data Aquisition system*), requer etapa de condicionamento. Conforme à

disponibilidade, optou-se pelo emprego do amplificador *Universal In-Line Transducer Amplifier* modelo UV da Sensotec-Honeywell [155], cujas características, indicadas na tabela 13, se adaptaram adequadamente ao projeto.

Tabela 13 – Especificações do condicionador de sinais usado.

| Universal In-Line Amplifier UV – SENSOTEC | |
|---|---------------------|
| Ganho | 100 a 1000 |
| Ajuste de ganho | ± 25 % |
| Não linearidade | ± 0,02 % FM |
| Offset | ± 0,1 % FM |
| Tensão alimentação | (+11 a +28) V de CC |
| Tensão de saída | (- 5 a + 5) V |
| Resposta dinâmica | 0 Hz a 5 kHz |
| Células de carga | (0,5 a 5,0) mV/V |
| Excitação da ponte | 3 V ou 5 V |



Fonte: [155].

O sistema empregado para fazer a aquisição dos sinais de corrente e conjugado e permitir o controle de acionamento da bancada foi a placa (DAQ) PCI-4452 [156] –*Dynamic Signal Aquisition and Generation*–, fabricada pela National Instruments (NI). As características do dispositivo, para a faixa de operação empregada nas medições (± 10 V), estão relacionadas na tabela 14.

Tabela 14 – Especificações da placa de aquisição.

| DAQ NI PCI-4452 | |
|--------------------------|-----------------------------|
| Interface de comunicação | PCI |
| Entradas analógicas | 4 com amostragem simultânea |
| Resolução de entrada | 16 bits (305,18 μ V) |
| Frequência de amostragem | 204,8 kHz máxima |
| Faixa de medição usada | (-10 a +10) V |
| Configuração de entrada | diferencial ou comum |
| Tipo conversor ADC | delta-sigma |
| Canais digitais de E/S | 8 (TTL/CMOS 5 V) |
| CMRR | 90 dB |



Fonte: [156].

4.3.2.4 Fontes de alimentação

A norma ABNT NBR 5383-2 [81] estabelece que o desempenho de um motor de indução não depende somente dos valores de tensão e frequência empregados, mas também da forma de onda associada. Assim, além de observar as especificidades de medição, faz-se necessário utilizar fontes de alimentação adequadas para garantir o sucesso do ensaio. Tal recomendação também serviu de base para a escolha das fontes, empregadas na alimentação dos transdutores e sistemas da bancada.

Na tabela 15 estão relacionados os níveis de tensão e potência necessários para alimentar os circuitos e transdutores da bancada protótipo e o estator submetido a avaliação.

Tabela 15 – Tensões de alimentação para a bancada protótipo.

| Fontes de alimentação | | | |
|--|---------------------|------|----------|
| Circuito | Tensão | Tipo | Potência |
| Amplificador e condicionador da ponte | entre +11 V e +32 V | CC | 0,20 VA |
| Transdutor de torque | +5 V | CC | 0,02 VA |
| Transdutor de corrente | +15 V e -15 V | CC | 0,15 VA |
| Acionamento elétrico | + 12 V | CC | 0,5 VA |
| Potência: estator do motor | (60 a 220) V | CA | 750 VA |
| Sistema de aquisição de dados (placa DAQ e PC) | 220 V | CA | 250 VA |

Fonte: Autor.

A tensão de alimentação para o transdutor de torque é fornecida pelo condicionador de sinais (amplificador universal [155]); o sistema de aquisição de dados é alimentado a partir da fonte do computador (PC) ligado à rede comercial de 60 Hz; adaptou-se o acionamento elétrico para operar com tensão CC de 15 V. Desse modo, além da rede CA de 220 V comercial, todo o sistema requer apenas de duas fontes adicionais: uma CC simétrica de 15 V e uma CA ajustável que forneça tensões entre 60 V e 220 V, com uma potência de, pelo menos, 750 VA.

Os estatores em teste foram alimentados inicialmente, a partir da fonte de monofásica Supplier FCAM 150-30-15, de 1500 VA. Entretanto, devido a algumas limitações na qualidade do sinal de potência de saída, optou-se posteriormente pelo uso da fonte Agilent AC Power Source 6812B [157], de 750 VA de potência (figura 59).

Figura 59 – Fonte de potência HP 6812B usada na BPERB.



Fonte: [157].

Conforme as especificações dadas pelo fabricante da fonte de potência HP 6812B [157], considerada para alimentar a bancada, ela é capaz de fornecer valores eficazes de corrente e tensão CA constantes, em regime permanente, na faixa de 0 A a 6,5 A e de 0 V a 115 V, respectivamente, com regulação de carga menor que 0,5%. Portanto, de acordo com a potência exigida pelo ensaio, considerou-se que a fonte atende os requisitos de alimentação do mesmo.

4.3.2.5 Medição de temperatura e resistência

Para verificar a variação da resistência durante a execução dos ensaios, decorrente das variações na temperatura pelo aquecimento dos fios, foi implementada, adicionalmente, a medição dessas grandezas por meio do sistema de aquisição de dados Agilent 34972A [157]. Tal sistema permite medir e digitalizar 11 diferentes tipos de sinais com 22 bits de resolução.

A leitura de resistência dos enrolamentos BA e BP foi feita diretamente pelo ohmímetro do Agilent 34972A e para temperatura, foi empregado um termorresistor (RTD – *Resistance Temperature Detector*) de platina, que apresenta resistência típica de 100 Ω a 0 °C. Ambos os dispositivos foram conectados em configuração de medição a quatro fios, visando reduzir a influência dos cabos de conexão. O RTD foi situado perto do enrolamento do estator para medir a temperatura na vizinhança dele.

A medição a quatro fios da resistência precisou, adicionalmente, de um sistema de chaveamento para automatizar a leitura da grandeza, de forma que possibilitasse desligar as conexões dos enrolamentos do estator com a fonte de alimentação, realizar a medição, e reconexão da fonte, justo antes e logo depois de cada teste com o rotor bloqueado.

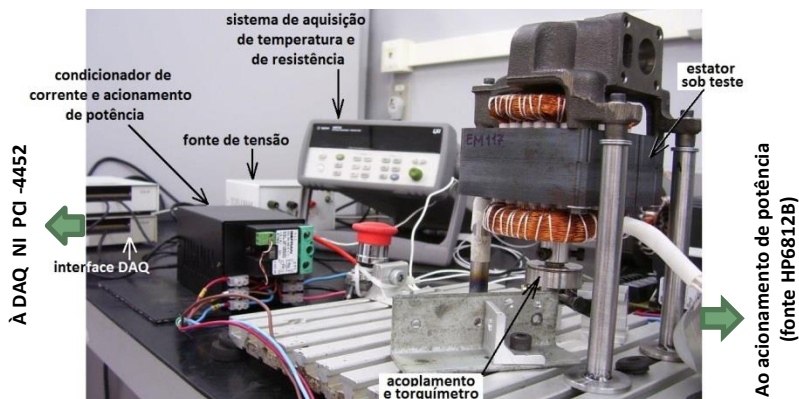
4.3.3 Medidas para melhorar a repetibilidade e reprodutibilidade

Foram estabelecidos vários procedimentos visando melhorar a repetibilidade e a reprodutibilidade dos ensaios, dentre eles:

- medição a quatro fios e registro da resistência elétrica dos enrolamentos antes e depois de cada teste para verificação do efeito da temperatura;
- avaliação do efeito da mudança da temperatura ambiente no resultado dos ensaios (no projeto mecânico e deriva térmica em sistema de medição);
- definição do ângulo mecânico mais adequado ao ERB e marcação do rotor de teste e bloco da bancada, visando a reprodução de tal posição relativa em demais procedimentos;
- criação de mecanismo de travamento do rotor de teste, capaz de mantê-lo firmemente fixado ao acoplamento do torquímetro, por meio de parafuso único;
- configuração do tempo entre testes em 300 segundos (5 minutos);
- realização dos testes em condições ambientais semelhantes.

Alguns dos procedimentos relacionados foram incorporados fisicamente à bancada de ensaios, ilustrada pela figura 60, e outros passaram a integrar a rotina de ensaios.

Figura 60 – Vista parcial da BPERB testada no laboratório.



Fonte: Autor.

Em se considerando a BPERB funcional, realizaram-se vários ensaios piloto para o ajuste de características elétricas e mecânicas (tensão aplicada, duração, tempo de medição, travamento mecânico de rotor), visando a determinação de procedimento de rotina para execução dos ensaios.

4.4 ENSAIOS PRELIMINARES

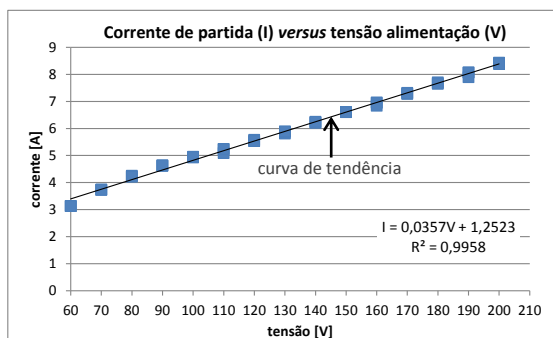
As respostas em conjugado e corrente, obtidas nos primeiros ensaios da BPERB, propiciaram avaliação do funcionamento da bancada e a definição de procedimento de ensaio. Algumas peças da amostra fornecida pelo fabricante, e caracterizadas previamente como apresentado em 4.3.1, foram usadas nesses ensaios preliminares.

4.4.1 Definição da tensão do ensaio

Para definir a tensão aplicada aos estatores na BPERB, buscou-se alcançar um nível adequado de resposta de conjugado, em testes realizados com diferentes valores de tensão em vazio e com rotor bloqueado.

A figura 61 ilustra o comportamento linear apresentado pela corrente de partida em vazio do estator acoplado ao rotor de teste, como resposta à variação de 60 V a 200 V na tensão de alimentação (foram feitas três medições para cada valor).

Figura 61 – Corrente de partida em vazio *versus* tensão de alimentação para o estator EM117 acoplado com o rotor de teste.



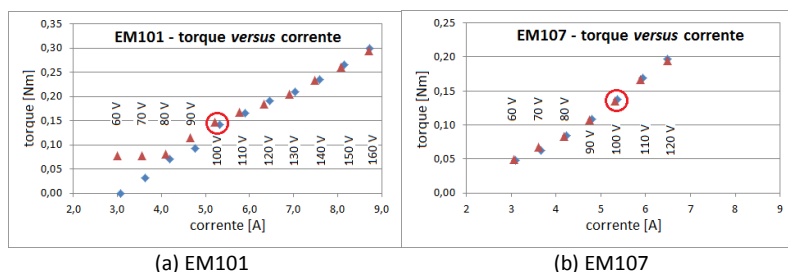
Fonte: Autor.

Nota: R^2 é o coeficiente de determinação da linha de regressão linear.

No ERB, a corrente que circula pelos enrolamentos do estator tem que ser controlada para não exceder a capacidade máxima de condução dos fios empregados, evitando assim, danos aos seus isolamentos. Portanto, avaliaram-se preliminarmente vários níveis de tensão, buscando determinar um valor capaz de limitar a corrente durante os ensaios.

Como se pode observar na figura 62, foi registrado o comportamento das grandezas de interesse mediante aumento e diminuição da tensão de alimentação do estator, em passos de 10 V. Para o estator EM101 (figura 62a) avaliaram-se tensões de 60 V a 160 V e de 160 V a 60 V. Analogamente foi feito para o EM107 (figura 62b), com tensões entre 60V e 120 V. Cada um dos valores plotados é a media de 3 testes de 1 s à temperatura ambiente de $(20 \pm 1) ^\circ\text{C}$. Considerou-se tempo de relaxamento de 1 minuto entre cada teste, pois resultados anteriores evidenciaram que a variação após esse tempo de espera influencia em menos de 1% as resposta de pico da corrente e conjugado de RB. Na ilustração, destacam-se as respostas para tensões de 100 V.

Figura 62 – Efeito da variação da alimentação para dois estatores em ERB.



Fonte: Autor.

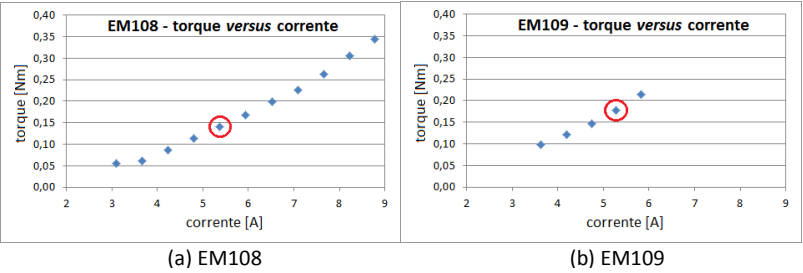
Nota: em azul (\diamond) aumentando a tensão e em vermelho (Δ) reduzindo-a.

As respostas obtidas confirmam as expectativas de que o aumento da tensão de teste produz aumento da corrente e do conjugado. As duas condições de ensaio revelaram pequena histerese, que pode ser decorrente de folgas no sistema mecânico, entretanto, o comportamento das grandezas de interesse se mostrou mais homogêneo durante os testes de elevação de tensão. Significativa alteração da resposta de conjugado foi observada com 60 V e 70 V, nos testes em que a tensão era reduzida.

Leituras médias de conjugado e corrente rms (entre 0,4 s e 1 s) foram plotados também para o ERB nos estatores EM108 e EM109, como ilustrado na figura 63, visando comparar a homogeneidade

observada com aumento da tensão, destacando-se de novo a resposta obtida para 100 V, como um valor representativo do comportamento.

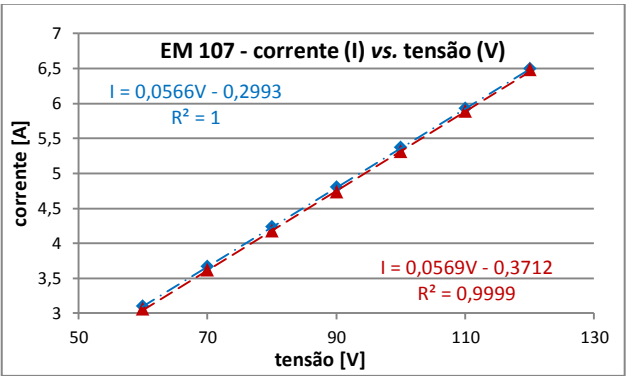
Figura 63 – ERB para dois estatores da amostra.



Fonte: Autor.

Na figura 64 é apresentada a resposta característica da corrente em função da tensão do estator em ERB, a qual caracteriza a impedância da peça EM107 em condição de partida (BA em paralelo com BP). No ensaio foi avaliado, novamente, a influência do aumento e diminuição da tensão de alimentação.

Figura 64 – Curva característica corrente-tensão do ERB para EM107.



Fonte: Autor.

Conforme aos resultados mostrados, visando empregar um valor de tensão como parâmetro de ensaio comum na bancada, que permitisse uma condição de operação segura e análoga à nominal, cuja resposta em corrente e conjugado fosse característica e que pudesse ser utilizada para

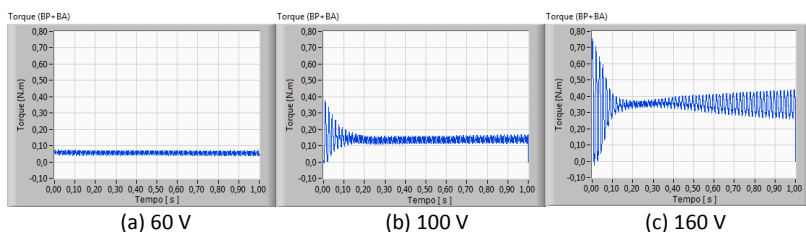
inferir a resposta em outras tensões de alimentação, e com consumo de potência reduzido, estabeleceu-se em 100 V (45,5% do valor nominal) o nível de tensão de ERB aplicável à classe de estatores sob investigação.

4.4.2 Resposta de conjugado

Respostas de conjugado obtidas em primeiros testes, como as ilustradas na figura 65, são fortemente oscilatórias, causadas pela interferência da rede elétrica, mostrando frequência fundamental de 60 Hz. Além disso, em todo o teste as respostas podem ser influenciadas pelas oscilações eletromagnéticas associadas a essa frequência da rede de alimentação. Observou-se, também, que no início do teste, a bancada está sujeita às oscilações mecânicas decorrentes do rebatimento do mecanismo de travamento.

O condicionador de sinais da Sensotec-Honeywell [155], usado na bancada, não possui sistema de filtragem para atenuação dessa interferência, pois é voltado a aplicações automobilísticas em corrente contínua. Houve então necessidade da aplicação de um filtro adequado para redução da influência da rede de alimentação nos sinais de interesse.

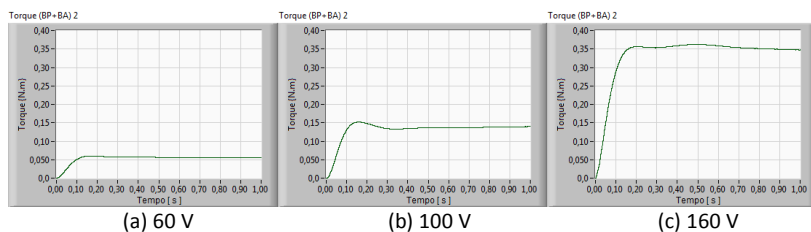
Figura 65 – Resposta de conjugado para o estator EM108 com três tensões reduzidas de ensaio.



Fonte: Autor.

Diversas configurações de filtragem podem ser usadas, para reduzir a oscilação no sinal de conjugado e facilitar a leitura dessa grandeza. Para a bancada, escolheu-se um filtro digital passa-baixos (PB) de segunda ordem tipo Butterworth, com frequência de corte em 4 Hz. Depois do tratamento de filtragem, constatou-se que as variações observadas na resposta indicam apenas variações no conjugado. A resposta filtrada do conjugado para tensões de 60 V, 100 V e 160 V é apresentada na figura 66.

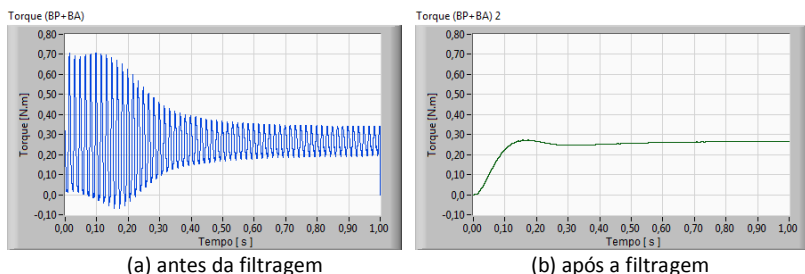
Figura 66 – Resposta do conjugado com filtro Butterworth PB de 4 Hz para o estator EM108 com três tensões de ensaio.



Fonte: Autor.

A ação do filtro pode ser evidenciada com apoio da figura 67, que apresenta resposta de conjugado para ERB com tensão de alimentação de 140 V CA e efeito da filtragem Butterworth de ordem 2, implementada por software. As oscilações ilustradas na figura 67(a), que correspondem à frequência da rede de 60 Hz, são atenuadas pela atuação do filtro, com frequência de corte em 4 Hz, resultando na curva representada pela figura 67(b).

Figura 67 – Resposta de conjugado para o estator EM108 alimentado com 140 V antes e após a filtragem.



Fonte: Autor.

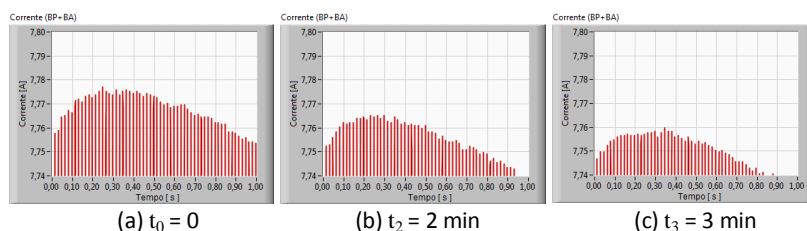
4.4.3 Variação da resposta de corrente no tempo

Na figura 68 estão ilustrados picos de corrente de 3 ERB em estator EM108, realizados em sequência, com tensão de 100 V. A imagem permite identificar comportamento que é característico dos demais ensaios realizados na bancada: decaimento da grandeza em cada procedimento, bem como diminuição da sua magnitude em avaliações subsequentes. Entretanto, no caso representado a variação é inferior a 25

mA, que representa 0,3% do valor medido e é aceitável frente às incertezas envolvidas no processo.

Considerou-se que a corrente eficaz do ensaio e a resistência média medida do paralelo de BA e BP (da amostra) sejam, respectivamente, 5,63 A e $8,19 \Omega$, provocar-se-ia 259,60 W de potência dissipada pelo efeito Joule nos condutores. Contudo, o aquecimento provocado poderia justificar o comportamento apresentado pela corrente.

Figura 68 – Resposta em corrente pico para ensaio do estator EM108 alimentado a 100 V para três instantes.



Fonte: Autor.

Em ensaios mais demorados ($> 1 \text{ s}$) o efeito do aquecimento é mais pronunciado. Acredita-se que, nesses casos, seja necessário maior tempo para que a temperatura dos elementos envolvidos (enrolamentos, núcleo, transdutores, peças mecânicas, entre outros) retorne à condição inicial, propicia à execução de novo procedimento. Assim, para os testes finais, definiu-se aumentar o tempo de espera entre ensaios em 5 minutos, com o intuito de reduzir ao máximo o possível efeito do aquecimento na resposta.

Outras condições, além do efeito Joule, podem produzir elevação de temperatura. Por exemplo, a variação do entreferro devida à excentricidade do rotor (dinâmica, estática ou mista) gera harmônicas no sinal de corrente [29][158] que podem produzir aquecimento, porém, só importante com o motor rolando após alguns minutos.

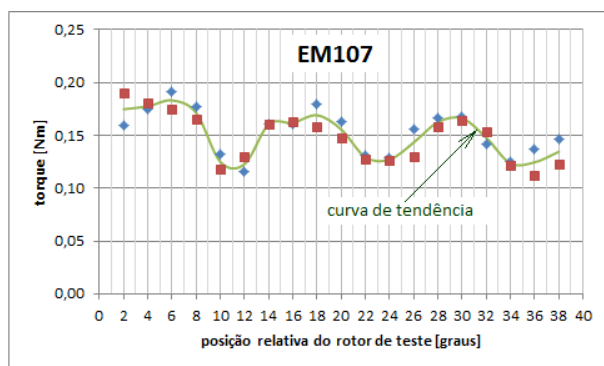
4.4.4 Definição da posição angular relativa entre rotor e estator

Como visto na seção 4.1.3, variações na posição relativa do rotor determinam oscilações na resposta do conjugado decorrentes da

interação e distribuição dos campos magnéticos. Esses campos, que podem se decompor em campos harmônicos, são determinados principalmente, pela geometria do entreferro e pela variação da permeância magnética (efeito da “abertura” das ranhuras) [29]. Assim, para obter leituras comparáveis a partir do ERB, faz-se necessário determinar uma adequada posição relativa do rotor e fixar um ponto de travamento para o eixo, de forma a repeti-la em ensaios posteriores.

Como a variação do sinal de conjugado é periódica, como visto em 4.1.3.2, se realizou ensaio de bloqueio ponto a ponto para uma região do estator, definida por arco escolhido de forma aleatória, cujo ângulo representasse pelo menos três ciclos da oscilação. Assim, como o rotor de teste consta de 28 barras, nos 360° de um giro se teriam 12,86 ciclos aproximadamente. Então, três de esses ciclos se completariam em $38,6^\circ$ de rotação. A figura 69 ilustra as respostas de conjugado, com alimentação de 100 V, para o rotor travado a cada 2° de uma região de análise compreendida em arco de 40° avaliado. Essa resposta mostra uma variação de aproximadamente 50% entre valores máximos e mínimos locais consecutivos, em relação ao valor médio do conjugado de 0,15 Nm.

Figura 69 – Curva de rotor bloqueado em 40° .



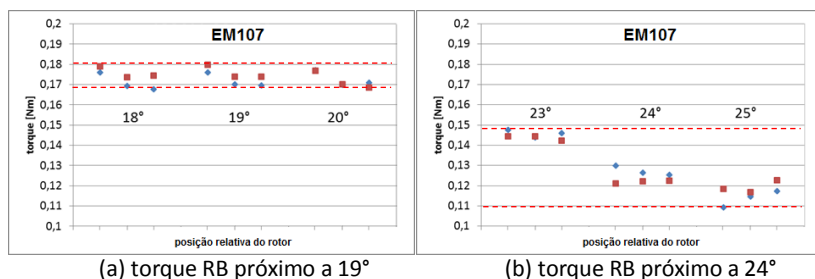
Fonte: Autor.

Além de adequada repetibilidade, a análise do ponto de bloqueio levou em consideração os níveis de incerteza associados. As normas IEEE114 [45] e NBR 5383-2 [81] definem que o conjugado de rotor bloqueado é o menor valor obtido em qualquer posição do rotor. Entretanto, optou-se por avaliar as vizinhanças dos valores de máximo (pico) e de mínimo (vale), pois a derivada da curva de conjugado possui

menores valores nessas regiões. Assim, pequenos desvios no posicionamento do rotor produziriam menores variações na resposta do conjugado.

Em se considerando a faixa observada, optou-se por avaliar as regiões próximas aos pontos do mesmo ciclo, em 18° (pico) e 24° (vale). Para obter maior resolução, propiciando melhor percepção do comportamento do conjugado ante eventuais pequenas variações no acoplamento mecânico, girou-se o rotor em passos de 1° em ensaios adicionais mais cuidadosos. Os resultados estão ilustrados na figura 70, a partir dos quais é observado que, apesar do registrado no ensaio anterior, 19° é um ponto adequado para travar o rotor na bancada e realizar os ensaios para a amostra. A variação na resposta do conjugado para as posições 18° e 20° foi inferior a 6%, e para 23° e 25° ultrapassou 21%.

Figura 70 – Resposta de RB em posições próximas a 19° e 24° .

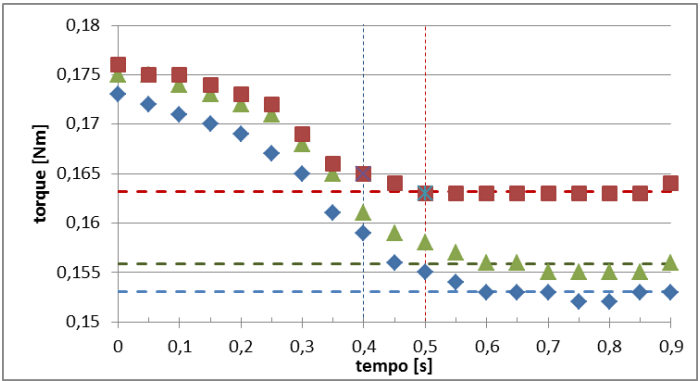


Fonte: Autor.

4.4.5 Medições de conjugado e corrente

Os resultados dos primeiros instantes do ERB são influenciados, em parte, pela acomodação mecânica das peças relacionadas ao travamento do rotor, transiente de corrente aplicada e resposta do filtro empregado. Após o transitório associado a esses fatores, os valores observados das grandezas de interesse atingem níveis satisfatórios, pois os desvios apresentados são inferiores a 5% do valor final de ensaio. Adicionalmente, nota-se que a estabilização da resposta é alcançada em 0,5 s, onde a variação se torna inferior a 2%. A figura 71 apresenta os valores médios de conjugado para três ERB de um segundo em função de faixas de tempo. No eixo das abscissas se representa o tempo inicial a partir do qual se fez a leitura, usado para calcular o valor médio numérico.

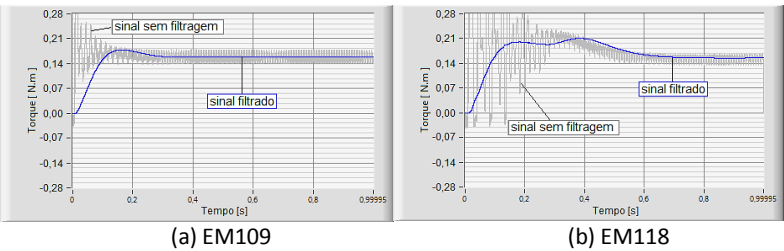
Figura 71 – Respostas de conjugado de RB indicando o tempo de estabelecimento em 0,5 s (ensaios para o estator EM118 alimentado a 100 V).



Fonte: Autor.

Em virtude das respostas ilustradas pela figura 71, considerando-se que o estator EM118 foi o que apresentou maior variação nas medições do conjugado (figura 72), definiu-se que o início das medições deveria ocorrer depois de 0,5 s, para garantir valores numéricos representativos. Portanto, valores prévios a 0,5 s foram tidos como transitórios e não foram considerados para avaliação da resposta.

Figura 72 – Resposta de conjugado de RB para dois estatores da amostra.



Fonte: Autor.

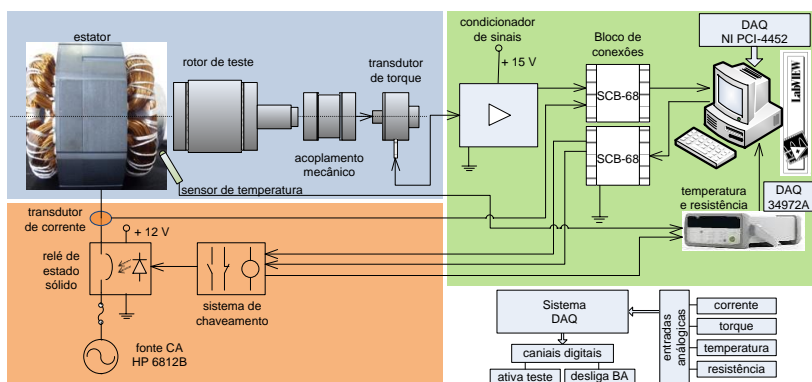
4.4.6 Diagrama de blocos da bancada protótipo de ensaio de rotor bloqueado

Para a implementação da bancada definitiva foram observadas as condições apontadas nas seções anteriores (4.4.1 a 4.4.5) e as respostas

de testes preliminares, feitos a partir da versão inicial. Em relação à versão anterior, foram acrescentados as medições de resistência a quatro fios e temperatura ambiente próxima ao enrolamento do estator em teste, como se pode observar na figura 73.

Conforme aos testes preliminares feitos a partir da versão inicial da bancada (figura 57) e às observações apontadas anteriormente, foi estruturada a BPERB usada para os testes segundo o diagrama de blocos indicado na figura 73, na qual foram acrescentadas as medições de temperatura ambiente próxima ao estator e de resistência a 4 fios.

Figura 73 – Diagrama de blocos da BPERB implementada.



Fonte: Autor.

4.4.7 Procedimento de ensaios

A qualidade dos ensaios a serem realizados pela BPERB depende, também, da observação do procedimento de rotina, definido tanto para caracterização do estator padrão quanto para as demais peças, o qual é indicado na sequência:

1. Preparar os equipamentos (medidores e fontes) e deixá-los ligados pelo menos uma hora (1 h) antes de iniciar os testes e tomar as leituras;
2. Estabelecer e registrar a temperatura ambiente;
3. Identificar os materiais dos fios condutores empregados nos enrolamentos (BA e BP) de cada estator;
4. Fazer medições de temperatura ambiente, próxima ao estator, e da resistência de enrolamentos, a quatro fios, registrando-as. O

intuito deste passo é caracterizar as condições da peça, permitindo determinar a elevação de temperatura durante o ensaio (ABNT NBR 17094-2:2008 sec. 9.3.4.1) [159];

5. Montar o estator na bancada verificando sua correta posição;
6. Verificar a uniformidade da distância entre estator e rotor (entreferro), por meio de lâminas adequadas (espiões), constatando que o rotor gire livremente. Deve-se verificar cuidadosamente o alinhamento entre rotor e estator para evitar que a excentricidade conduza a medições erradas;
7. Instalar o torquímetro com o acoplamento na posição angular predefinida para o rotor, fazendo coincidir as marcas preestabelecidas com as do estator, lembrando que o valor da leitura do conjugado vai depender da posição relativa entre rotor e estator. O parafuso de travamento e os parafusos de fixação devem ficar bem presos;
8. Rodar o software Labview com o programa destinado aos testes e verificar a comunicação com a placa de aquisição;
9. Ajustar, se preciso, os tempos de teste no software ($t_{BPp} + t_{BAux}$ entre 1 s e 5 s). O tempo predefinido de ensaio é de 1 s em configuração de partida e mais 1 s apenas com BP ligado;
10. Nomear o arquivo e a pasta de destino onde ficarão gravados os dados das aquisições;
11. Ajustar, se preciso, o tempo de espera entre testes (t_{espera}) acima de 60 s. Sugere-se observar o tempo de 300 s (como mínimo) para conseguir condições de temperatura homogêneas entre os testes do mesmo estator;
12. Ajustar o valor de tensão de saída da fonte de alimentação de potência em 100 V e 60 Hz. Verificar que as proteções da fonte estejam habilitadas;
13. Conectar a fonte de alimentação ao estator e, só depois, habilitar a saída de tensão.
14. Ligar e rodar o ERB. O software faz três testes consecutivos de acordo com o tempo de espera programado. Assim, os três testes por estator levarão $(3 \times t_{espera} + 3)$ s.

15. Uma vez finalizado o ensaio, desabilitar a saída de tensão na fonte e logo desconectar o estator;
16. Desmontar o estator da bancada, possibilitando a realização de ensaio em outra peça, o qual pode ser feito a partir do passo 5.

A observação do procedimento sugerido permite a obtenção de respostas de conjugado e corrente do ERB, que podem ser usadas tanto para obtenção do “padrão de comparação” quanto para a avaliação de outras peças com esse “padrão” como referência.

4.5 RESPOSTA DE CONJUGADO E CORRENTE DE ROTOR BLOQUEADO PARA A AMOSTRA

A partir das informações obtidas dos testes preliminares, foi ajustada a bancada e foram realizados ensaios para as peças da amostra, fazendo três testes para cada estator com um tempo de espera de 5 minutos entre si e temperatura ambiente de $20^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$.

Os resultados apresentados numericamente na tabela 16, obtidos dos ensaios, são apresentados graficamente por meio da figura 74, para o conjugado, e da figura 75, para a corrente. Nesses gráficos se inclui, adicionalmente, diagramas de caixa (*boxplot*), que mostram de forma descritiva a variação da resposta da amostra.

Tabela 16 – Respostas de conjugado e corrente para a amostra “padrão”.

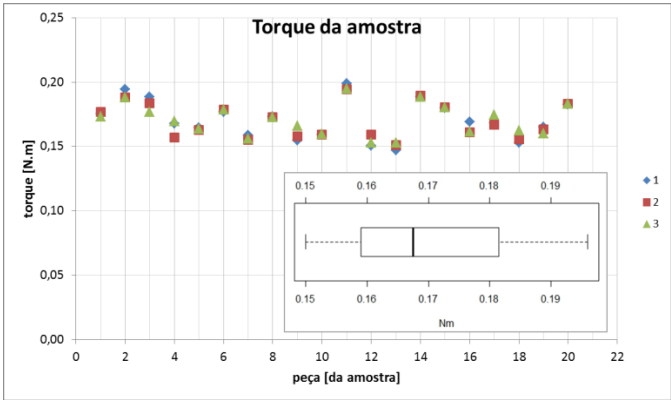
| Estator | conjugado [N·m] | | | | corrente [A] | | | |
|---------|-----------------|------------|------------|-------|--------------|------------|------------|-------|
| | 1 t_0 | 2 t_1 | 3 t_2 | Média | 1 t_0 | 2 t_1 | 3 t_2 | Média |
| EM101 | 0,175 | 0,177 | 0,173 | 0,175 | 5,61 | 5,61 | 5,61 | 5,61 |
| EM102 | 0,194 | 0,188 | 0,188 | 0,190 | 5,65 | 5,65 | 5,64 | 5,65 |
| EM103 | 0,188 | 0,183 | 0,177 | 0,183 | 5,60 | 5,60 | 5,60 | 5,60 |
| EM104 | 0,168 | 0,157 | 0,169 | 0,165 | 5,62 | 5,62 | 5,62 | 5,62 |
| EM105 | 0,164 | 0,163 | 0,164 | 0,164 | 5,61 | 5,61 | 5,60 | 5,61 |
| EM106 | 0,177 | 0,178 | 0,178 | 0,178 | 5,63 | 5,63 | 5,63 | 5,63 |
| EM107 | 0,159 | 0,155 | 0,156 | 0,157 | 5,63 | 5,63 | 5,62 | 5,63 |
| EM108 | 0,173 | 0,173 | 0,173 | 0,173 | 5,66 | 5,66 | 5,66 | 5,66 |
| EM109 | 0,155 | 0,158 | 0,166 | 0,159 | 5,62 | 5,62 | 5,62 | 5,62 |

| Estator | conjugado [N·m] | | | | corrente [A] | | | |
|-----------|-------------------|-------|-------|-------|---|------|------|------|
| EM110 | 0,159 | 0,159 | 0,160 | 0,159 | 5,64 | 5,64 | 5,64 | 5,64 |
| EM111 | 0,199 | 0,195 | 0,195 | 0,196 | 5,65 | 5,65 | 5,64 | 5,65 |
| EM112 | 0,151 | 0,159 | 0,153 | 0,154 | 5,65 | 5,65 | 5,65 | 5,65 |
| EM113 | 0,147 | 0,151 | 0,153 | 0,150 | 5,63 | 5,62 | 5,62 | 5,62 |
| EM114 | 0,188 | 0,189 | 0,189 | 0,189 | 5,63 | 5,62 | 5,62 | 5,62 |
| EM115 | 0,180 | 0,180 | 0,181 | 0,180 | 5,61 | 5,61 | 5,61 | 5,61 |
| EM116 | 0,169 | 0,161 | 0,162 | 0,164 | 5,62 | 5,62 | 5,62 | 5,62 |
| EM117 | 0,168 | 0,167 | 0,175 | 0,170 | 5,63 | 5,63 | 5,63 | 5,63 |
| EM118 | 0,153 | 0,156 | 0,163 | 0,157 | 5,62 | 5,62 | 5,62 | 5,62 |
| EM119 | 0,165 | 0,163 | 0,160 | 0,163 | 5,66 | 5,66 | 5,66 | 5,66 |
| EM120 | 0,183 | 0,183 | 0,183 | 0,183 | 5,65 | 5,64 | 5,64 | 5,64 |
| Resultado | (0,17 ± 0,03) N m | | | | Eficaz (5,63 ± 0,04) A de pico (7,96 ± 0,06) A | | | |

Fonte: Autor.

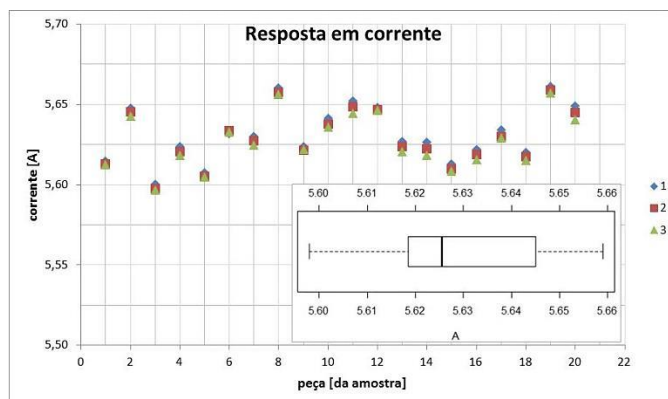
A variabilidade foi calculada através da utilização do coeficiente “*t*” de Student para amostras finitas e com intervalo de confiança de 95% ($t_{95\%,19}=2,093$) [160], considerando apenas os resultados das leituras realizadas (desconsiderando as incertezas dos instrumentos de medição).

Figura 74 – Resposta de conjugado no ERB para a amostra.



Fonte: Autor.

Figura 75 – Resposta de corrente no ERB para a amostra.



Fonte: Autor.

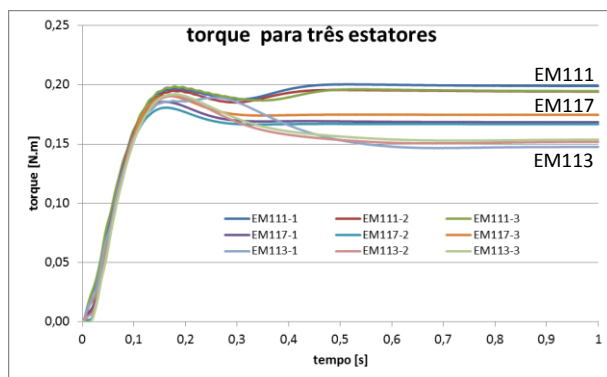
Os resultados revelaram que a resposta de conjugado apresenta variabilidade muito maior que a da corrente. Para o coeficiente t de Student empregado, com intervalo de confiança de 95%, identificou-se variabilidade próxima de 17% para o conjugado; enquanto que para a corrente se observou variação menor que 1%.

A homogeneidade da amostra, indicada em 4.3.1, foi confirmada pelas respostas de corrente. Nesse caso, a grande dispersão observada na leitura de conjugado é forte indicativo de que o ERB é susceptível à reprodução das condições mecânicas na montagem e travamento de rotor, apesar de todos os esforços empregados para se conseguir boa repetibilidade da bancada.

Na figura 76 estão ilustradas as curvas de resposta de ERB para três estatores da amostra padrão, a partir das quais foram obtidos valores relacionados na tabela 16: EM111 – conjugado máximo; EM113 – conjugado mínimo; EM117 – conjugado com valores próximos à média de todos os ensaios.

Para avaliar a aplicabilidade da BPERB foi considerado realizar testes em estatores em duas condições: que não formassem parte da amostra padrão e com defeitos conhecidos (fabricados).

Figura 76 – Curvas de resposta do conjugado de RB para três estatores da amostra padrão.



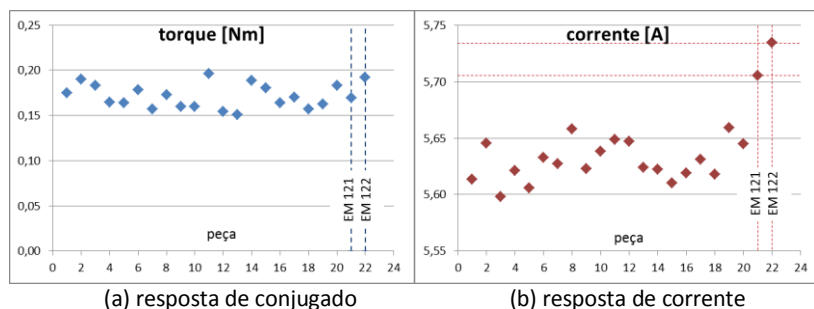
Fonte: Autor.

4.5.1 Avaliação de peças fora do padrão da amostra

Para avaliar o potencial de detecção de defeitos da BPERB foram submetidos a teste, além das 20 peças da amostra padrão cujos resultados estão relacionados na tabela 16, dois estatores de mesmo modelo, provenientes de diferentes lotes de produção e data de fabricação anterior, marcados como EM121 e EM122. Adicionalmente avaliou-se um estator com enrolamentos de alumínio, marcado como EM201, com o propósito de analisar a resposta do ensaio sobre uma peça classificada erroneamente, que pudesse alcançar uma linha de montagem posterior.

As informações de conjugado e corrente obtidas junto aos estatores EM101 a EM122 estão representadas na figura 77. Sob as mesmas condições de ensaio, observa-se que os valores de conjugado das peças EM121 e EM122 permanecem dentro da faixa de variação do padrão (EM101 a EM120); porém, o valor medido da corrente cai fora dela. Considerando que esses dois estatores são de lotes de produção anteriores, a diferença na resposta de corrente pode decorrer de algum aprimoramento no processo de fabricação para diminuição das perdas, possivelmente nas chapas do núcleo de aço, alterando as características de consumo e, conseqüentemente, de corrente [69]. As variações da corrente com relação ao valor médio do padrão representam 1,3% para o EM121 e 1,9% para o EM122.

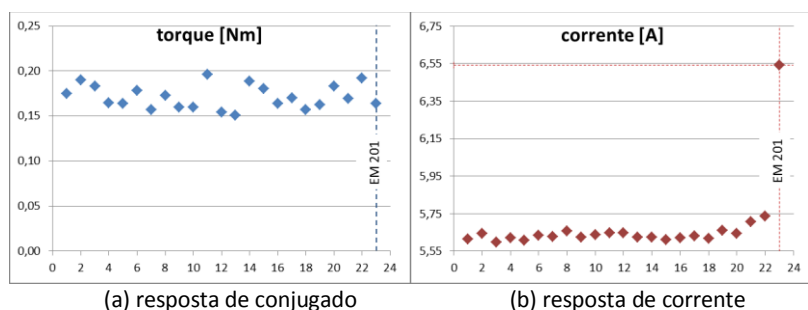
Figura 77 – Respostas do conjugado e corrente da amostra e dos estatores EM121 e EM122.



Fonte: Autor.

Para o estator EM201 com enrolamentos de alumínio, a resposta em corrente foi consideravelmente maior (16%), enquanto o conjugado se manteve na faixa de variação do padrão. Na figura 78 se apresentam as respostas de conjugado e corrente da amostra padrão junto aos resultados obtidos nos ensaios dos estatores EM121, EM122 e EM201. O maior valor de corrente observado, destacado para o estator EM201 na figura 78(b), pode decorrer de maiores perdas no enrolamento, visto que a resistividade do alumínio é maior que a do cobre, usado nas bobinas dos estatores da amostra padrão.

Figura 78 – Respostas do conjugado e corrente da amostra padrão e do estator EM201.



Fonte: Autor.

Os limites de aceitação, para valores de resistência dos enrolamentos, que pode ser de $\pm 5\%$ [72], permitem interpretar oscilações nos valores de corrente como sendo variações naturais do

processo produtivo. Dessa forma, apenas a resposta de corrente do estator EM201 poderia ser interpretada como anômala, possibilitando a caracterização da peça como defeituosa.

4.5.2 Avaliação com defeitos fabricados

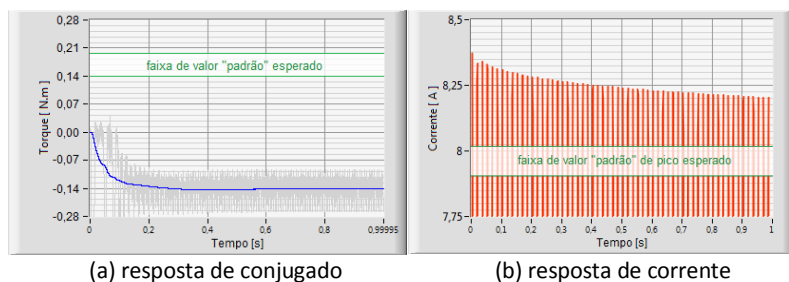
Nesta seção é avaliado o potencial do ERB em detectar anomalias em características elétricas fundamentais dos estores. Para tanto, emularam-se defeitos na peça EM122, comparando os resultados obtidos de conjugado e corrente com aqueles provenientes da amostra padrão.

4.5.2.1 Giro invertido

Erros nas ligações das bobinas, durante o processo de fabricação do estator, podem resultar na disposição invertida das extremidades do enrolamento BA em relação a BP. Nessa condição se produziria rotação resultante em sentido oposto ao esperado, comprometendo o correto funcionamento do compressor. Para reproduzir essa situação, sem intervir nas ligações internas dos enrolamentos, pode-se recorrer à montagem invertida do estator, que, em consequência, produziria a rotação contrária do rotor.

Na figura 79 se apresentam as respostas ao teste de RB para um estator montado de forma a produzir conjugado negativo, comparando-se com o mesmo em condição correta. Assim, avalia-se a capacidade da bancada em identificar “defeito” de ligação em estator, quando esse resultar em giro invertido. Como se pode observar na figura 79, a leitura de conjugado resulta em valores negativos (a), indicando erro no sentido de giro do rotor, e valores de corrente acima do esperado (b).

Figura 79 – Respostas de conjugado e corrente com estator invertido.



Fonte: Autor.

4.5.2.2 Curto circuito entre espiras

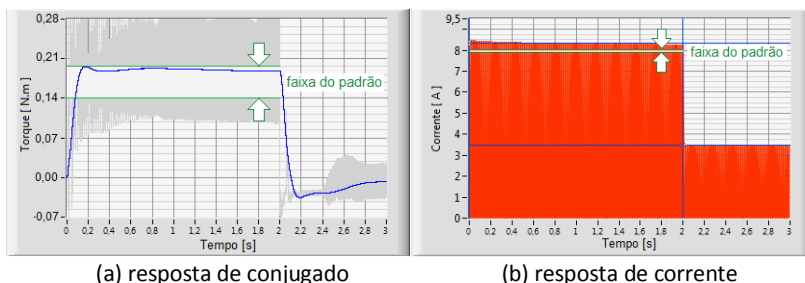
Foram também realizados curto-circuitos entre espiras, tanto no enrolamento principal quanto no enrolamento auxiliar. Em se comparando com a resposta em condição normal, sem curto-circuito (figura 80), observa-se significativa variação nas correntes resultantes (figuras 81b e 82b). Os curto-circuitos fabricados anulam quantidade não controlada de espiras e foram feitos como se descreve a seguir:

- para o BP, foram ligadas espiras próximas de dois grupos de ranhuras diferentes, R5 e R6, que contam com 107 e 75 espiras respectivamente. Por meio da medição de resistência a 4 fios, foi observada uma diminuição de $1,67 \Omega$ em relação à condição de BP normal (sem curto-circuito em suas 364 espiras). Portanto, considera-se que o curto-circuito tenha sido feito para 46 espiras (12,6% do total de BP). Os resultados decorrentes para este caso estão ilustrados na figura 81;
- para o BA, foram unidas espiras próximas de uma mesma ranhura, grupo R4, que conta com 30 espiras. A medição de resistência a 4 fios indicou uma diminuição de $1,79 \Omega$ em relação ao BA normal (sem curto-circuito em suas 218 espiras). Considera-se, portanto, que tenham sido anuladas 20 espiras (9,2% do total de BA). As respostas obtidas para este caso estão representadas na figura 82.

Os testes foram realizados em três segundos, para ambas as situações supracitadas, sendo dois segundos para BP+BA, e o restante apenas para BP.

Na resposta em corrente, figuras 80(b), 81(b) e 82(b), foram indicados com linhas horizontais os valores “nominais” esperados, em condição de partida (BP+BA), e em condição permanente, apenas BP ligado, para efeitos de comparação.

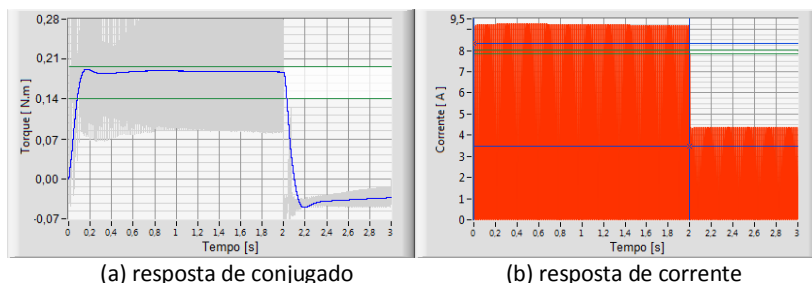
Figura 80 – Respostas de conjugado e corrente do EM122 em condição normal.



Fonte: Autor.

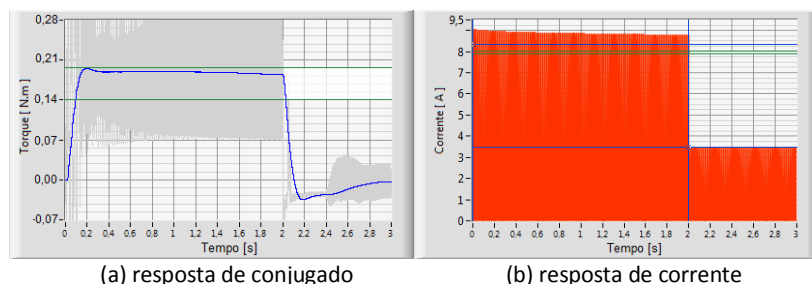
Como esperado, quando são curto-circuitadas espiras em BP, a corrente aumenta, tanto antes quanto depois de ser liberado o BA. No caso em que são curto-circuitadas apenas espiras de BA, o incremento da corrente só é observado enquanto esse enrolamento fica ligado.

Figura 81 – Respostas de conjugado e corrente do EM122 com curto-circuito entre espiras do BP.



Fonte: Autor.

Figura 82 – Respostas de conjugado e corrente do EM122 com curto-circuito entre espiras do BA.



Fonte: Autor.

Como se pode observar nas figuras 80(a), 81(a) e 82(a), os defeitos fabricados de curto-circuito não provocaram alterações expressivas nas curvas de conjugado.

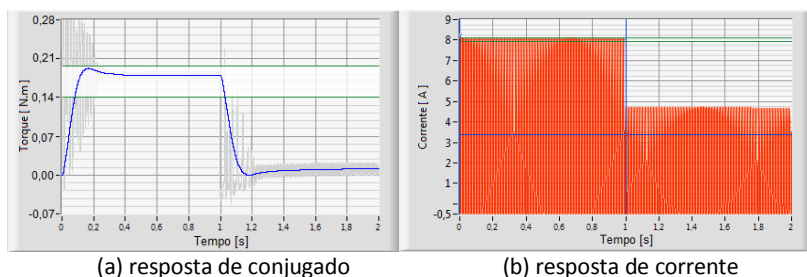
4.5.2.3 Erro no conector do estator

A ligação do estator é feita através da caixa de tomada, que dispõe de três pinos de conexão, M, S, e C, onde M e C são

extremidades de BP, e, S e C são terminações de BA. Assim, M indica o pino do enrolamento principal, S do enrolamento auxiliar y C do ponto comum. Ligações mal feitas podem resultar em alterações nessa configuração ou em descontinuidades elétricas.

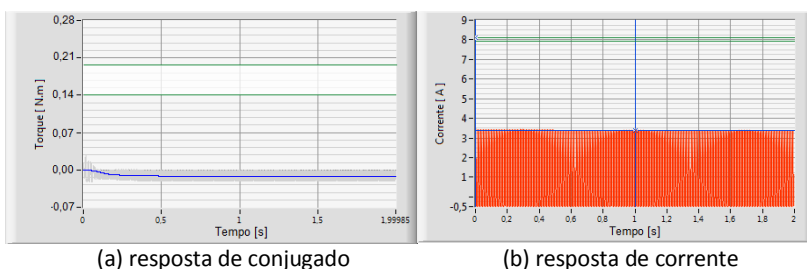
Para avaliar desvios resultantes das alterações no conector, foram realizados testes alterando a posição dos pinos. Na sequência são apresentadas respostas obtidas para algumas possíveis configurações. A figura 83 apresenta o caso da troca entre os pinos M e S, no conector, e a figura 84 dos pinos M e C. A figura 85, por sua vez, ilustra as respostas para o caso em que o pino S está desconectado de BA. Adicionalmente, poderiam ocorrer situações em que a configuração junto a cada um dos pinos estivesse alterada. Tal condição foi emulada fazendo M, S e C ocuparem, aleatoriamente, posições diferentes da correta. Os resultados obtidos estão ilustrados na figura 86.

Figura 83 – Respostas de conjugado e corrente para o estator EM117 com pinos M e S trocados no conector.



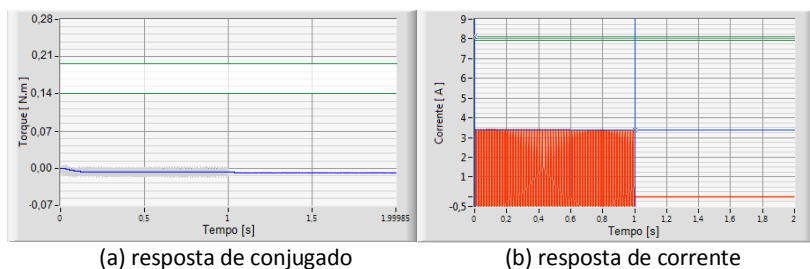
Fonte: Autor.

Figura 84 – Respostas de conjugado e corrente para o estator EM117 com pinos de M e C trocados.



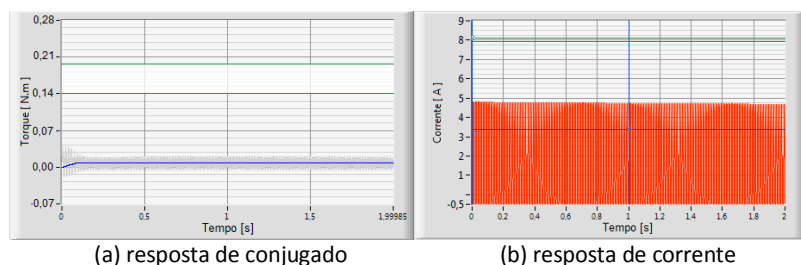
Fonte: Autor.

Figura 85 – Respostas de conjugado e corrente para o estator EM117 com o pino de S desligado no conector.



Fonte: Autor.

Figura 86 – Respostas de conjugado e corrente para o estator EM117 com pinos M, S e C trocados no conector.



Fonte: Autor.

4.6 CONSIDERAÇÕES DO CAPÍTULO

Neste capítulo foram abordadas as características principais do ensaio de rotor bloqueado e o desenvolvimento de uma bancada protótipo para avaliar sua aplicabilidade ao controle da qualidade de produção de estatores para motores de indução. Nesse contexto, caracterizou-se padrão de comparação, a partir das respostas de corrente e conjugado de conjunto homogêneo de peças, e investigou-se a capacidade de detecção de alguns defeitos típicos, por meio de ensaio.

No capítulo a seguir serão apresentadas as conclusões e recomendações em relação à pesquisa realizada e aos resultados obtidos, tanto teóricos como experimentais, frente aos objetivos propostos.

5 CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS

FUTUROS

Neste capítulo são apresentadas as conclusões em relação aos objetivos propostos e resultados obtidos. Adicionalmente, são fornecidas algumas sugestões para dar continuidade ao trabalho.

5.1 CONSIDERAÇÕES

Sistemas de refrigeração de pequeno porte utilizam compressores herméticos para a realização das trocas de calor entre ambientes. Em parcela significativa desses sistemas, a motricidade é garantida por motores elétricos de indução associados aos compressores. Alguns fabricantes de compressores produzem, também, os elementos que constituem os motores elétricos. Como estas máquinas só tomam forma definitiva depois de integrados ao compressor, faz-se necessário avaliar alguns desses elementos separadamente, entre eles o estator.

Em geral, pode-se dizer que um só ensaio não é sensível a todos os tipos de defeitos nem pode dar uma indicação absoluta da condição do estator.

No processo de fabricação de estatores são realizados vários procedimentos visando garantir a qualidade de cada peça produzida, seguindo critérios de conformidade ajustados à variabilidade natural do processo. Entretanto, em plantas com elevado fluxo de produção, até mesmo ensaios potencialmente mais capazes acabam sendo utilizados apenas como filtros de tipo passa não-passa, permitindo que peças defeituosas sejam classificadas como produto conforme, afetando negativamente os indicadores de rejeito de cliente.

Nesse contexto, o presente trabalho considerou as características principais do motor de indução monofásico, destacando aspectos relacionados ao sistema de isolamento e ensaios aplicáveis ao controle da qualidade. Foram analisados os ensaios de descargas parciais e de rotor bloqueado, como ferramentas complementares de detecção de defeitos de fabricação em estatores de motores de compressores herméticos para refrigeração. Além da análise teórica dos dois métodos, baseada em consulta de normas aplicáveis e literatura relacionada disponível, faz-se análise experimental do ensaio de rotor bloqueado, através de bancada concebida, projetada e desenvolvida para esse propósito.

5.2 CONCLUSÕES

Na sequência são apresentadas as considerações sobre o alcance dos objetivos específicos, colocados em 1.2.2, para cada um dos métodos estudados.

5.2.1 Ensaio de descargas parciais

Foram apresentados os conceitos básicos e principais fenômenos que podem intervir na atividade e detecção das descargas parciais (DP), visando sua aplicação como ferramenta para detecção de defeitos em estatores de motores de indução monofásicos.

O nível de DP internas traduzido pelas grandezas carga aparente (q), número de pulsos (*hits*), tensão de início (PDIV) e de extinção (PDEV), pode fornecer informações importantes sobre o estado de um isolamento. Uma alta atividade de DP, indicada por maiores valores de q ou de *hits*, menores de PDIV ou de PDEV, em relação a valores considerados normais para um dado estator, em determinadas condições ambientais, pode indicar vulnerabilidade ou mesmo defeitos no sistema de isolação como função de uma distribuição de probabilidade (dada a natureza estocástica do fenômeno).

Vários são os aspectos que podem influenciar a atividade e detecção de DP, favorecendo ou dificultando sua utilização como ferramenta para avaliação da conformidade de estatores de baixa tensão. Dentre eles, destacam-se: tensão e frequência de teste; temperatura; pressão barométrica; umidade; gases no entorno; variações de aspectos construtivos, como materiais, métodos, dimensões e espaçamentos; interferências eletromagnéticas; radiação ionizante; variações no sistema de medição, além da própria natureza randômica da atividade das DP.

O ensaio de DP, com tensões de teste baixas (por exemplo, inferiores a 1500 V), mostra-se útil na avaliação da condição de envelhecimento de isolamentos em medições realizadas através do tempo. Mas devido às condições muito específicas que precisa para sua realização e obtenção de resultados comparáveis, não se mostra como ferramenta robusta para inspeção rotineira da qualidade em plantas com elevado fluxo de produção de estatores, projetados com enrolamentos aleatórios para operarem em tensões monofásicas de redes de alimentação comerciais.

5.2.2 Ensaio de rotor bloqueado

Foi projetada, construída e avaliada uma bancada de ensaio de rotor bloqueado (ERB) para estatores de motores de indução monofásicos, componentes de um modelo representativo de compressor hermético comercial. A bancada protótipo integrou: sistema de montagem mecânico do estator em teste com um rotor padrão; medição de conjugado e corrente com rotor travado, temperatura, e resistência dos enrolamentos; sistema de chaveamento de sinais e potência; sistema de aquisição de dados e software de medição e controle.

Para avaliar a aplicabilidade do procedimento proposto, consideram-se as respostas obtidas de peças caracterizadas com alguns defeitos típicos em comparação com resultados decorrentes de amostra padrão.

A amostra padrão foi composta por 20 estatores considerados bons pelo fabricante. A homogeneidade das peças foi verificada pela medição de impedância dos enrolamentos principal e auxiliar, em 60 Hz. Em outras peças, estabeleceram-se defeitos de giro invertido, curto-circuito entre espiras e pinos trocados ou desconectados na caixa de tomada.

Em todos os estatores foram realizados ensaios de rotor bloqueado com tensão reduzida (45%). Da amostra padrão se obtiveram valores de referência de conjugado e corrente de $(0,17 \pm 0,03)$ Nm e $(5,63 \pm 0,04)$ A, respectivamente. Em se comparando tais respostas com aquelas provenientes das peças com defeitos “fabricados”, observa-se que o ERB mostra forte capacidade na detecção dos defeitos de giro invertido e de conexão na tomada do estator, onde tanto a resposta de conjugado quanto a de corrente indicam o desvio correspondente. No entanto, para os curto-circuitos estabelecidos, de 12,6% do total de espiras de BP e de 9,2% de BA, foi observada apenas variação na resposta de corrente, enquanto o conjugado se manteve dentro da faixa de variação do padrão.

Os maiores desafios no desenvolvimento da bancada se apresentaram no acoplamento mecânico entre o rotor de teste e estator sob ensaio. Porém, apesar dos esforços investidos na melhoria das condições de reprodutibilidade, a parte mecânica apresenta dificuldades consideráveis para fornecer medições adequadas de conjugado, visto que algumas leituras apresentaram variabilidade de até 17%.

Considera-se que o ERB tem potencial utilidade para avaliar estatores monofásicos como controle de qualidade e garantir a conformidade do produto, como filtro adicional aos testes habitualmente

aplicados. O ERB tem a grande vantagem de permitir avaliar o estator em certa condição dinâmica (análoga à condição de operação) antes mesmo dele integrar o compressor nas linhas de montagem.

A seguir, na tabela 17, apresentam-se de forma sucinta as principais características dos ensaios elétricos típicos aplicáveis aos estatores no estágio de fabricação conforme os resultados da pesquisa.

Tabela 17 – Ensaios típicos aplicáveis no estágio de fabricação de estatores

| Nome | Descrição | Potencial de detecção |
|--|--|---|
| Medição de resistência elétrica | Mede-se a resistência ôhmica a quatro fios dos enrolamentos BA e BP | Indica número de espiras efetivo, material e diâmetro de condutores, conexões com defeito, desvios de continuidade elétrica dos enrolamentos |
| Sentido de rotação do campo* | Aplica-se tensão de CA em condição de partida e verifica-se o sentido de giro por meio de sensores de efeito Hall | Grampeamento incorreto das bobinas dos enrolamentos, desvios na variação do campo, problemas de continuidade elétrica |
| Tensão aplicada (<i>hipot</i>)* | Aplica-se tensão de CA (ou CC) de valor elevado entre fios e núcleo. | Capacidade dielétrica do sistema de isolamento, curto-circuitos entre enrolamentos e núcleo. |
| Surto elétrico* | Aplica-se um sinal de surto de tensão (transitório) | Problemas de isolamento entre espiras e bobinas, curto-circuitos e variação de características elétricas relativas a um “padrão” |
| Descargas parciais (off-line) | Aplica-se tensão de CA elevada e detectam-se pulsos de descargas parciais | Fios fora do enrolamento ou muito próximos ao núcleo, variação de características de isolamento elétrico relativas a um “padrão” |
| Rotor bloqueado | Aplica-se tensão de CA em condição de partida e mede-se o conjugado mecânico no eixo e corrente elétrica nos enrolamentos. Precisa-se acoplamento de um rotor de teste | Problemas relativos à continuidade elétrica, grampeamento incorreto das bobinas dos enrolamentos, rotação invertida. Submete-se o estator a certa condição dinâmica antes da montagem no compressor |

Fonte: Autor.

Nota: Os ensaios sentido de rotação, tensão aplicada e surto são usados normalmente apenas como critérios de aceitação do tipo passa/não passa.

Por fim, conforme a proposta apresentada no capítulo 1, pode-se dizer que o presente trabalho atingiu seus objetivos de forma satisfatória e deixa aberta a possibilidade de ampliar estudos no mesmo caminho. Assim, o presente trabalho contribui para ampliar o conhecimento em relação às possibilidades para avaliação de estatores durante sua fabricação.

Para dar continuidade à pesquisa e aprimorar os resultados obtidos, na seção a seguir se apresentam sugestões para realização de trabalhos futuros.

5.3 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Nesta seção estão relacionados aspectos que precisam ser melhor investigados, visando adequação e aprimoramento dos métodos propostos. Adicionalmente são feitas considerações sobre atividades afins.

5.3.1 Descargas parciais

O uso do teste de DP para avaliação do sistema de isolamento em enrolamentos de motores de baixa tensão enfrenta muitos desafios, como o grande número de parâmetros a controlar. Embora seja possível comparar a atividade de DP com peças padrão, faz-se necessário determinar experimentalmente sinais e tensões de teste, PDIV e PDEV para os fios condutores empregados (tanto para cobre quanto para alumínio) em amostras representativas, com condições ambientais monitoradas e preferencialmente controladas (temperatura, umidade e pressão barométrica). Recomenda-se o estudo aprofundado, modelamento e avaliação experimental da influência desses diferentes parâmetros que incidem no comportamento e na atividade de DP, analisando estatisticamente quais seriam significativos.

Sugere-se avaliar experimentalmente a aplicabilidade do ensaio para detecção de descargas corona em estatores. Tal procedimento requer o uso de tensões de teste elevadas, com capacidade de ionização do ar. Consequentemente, deve-se estimar os níveis de tensão máxima suportáveis pelos isolamentos, considerando-se o enrolamento como um eletrodo e o núcleo do estator como outro, sem afetar as características de segurança da isolamento.

É crescente a tendência ao uso de inversores de frequência para controle otimizado da operação de motores de compressores herméticos.

Frente a ela, propõe-se estender a pesquisa para avaliação experimental do efeito dos sinais de alimentação controlados eletronicamente, com gradientes de tensão elevados (tipo PWM), no sistema de isolamento dos estatores. Da mesma forma, recomenda-se investigar a aplicabilidade do ensaio de DP para diagnóstico da capacidade da isolação empregada (por exemplo, em motores sem escovas de compressores de capacidade variável).

Sugere-se avaliar a aplicação do ensaio de DP para controle da qualidade do isolamento de fios condutores nos grandes carretéis de origem, anteriormente à sua utilização na linha de produção de estatores.

5.3.2 Ensaio de rotor bloqueado

A bancada desenvolvida enfrentou diversos desafios que fizeram evoluir varias vezes seu conceito inicial. Entretanto, ainda se faz necessário aprimorar o projeto mecânico para melhorar as condições de reprodutibilidade, quanto ao posicionamento angular e alinhamento entre rotor e estator. Também nesse aspecto, propõe-se realizar e avaliar ensaios com rotor de teste de diâmetro ligeiramente reduzido em relação ao nominal, visando facilitar o processo de acoplamento mecânico com o estator sob teste. Conforme os resultados obtidos neste trabalho, depois de aprimorada a bancada, esperar-se-ia que o comportamento da resposta de conjugado não varie muito em relação aos defeitos avaliados, porém, proporcionará condições mais homogêneas para avaliação da resposta em corrente do ERB.

Para melhorar a repetibilidade da bancada de ERB, é recomendável definir um ponto relativo ótimo de travamento entre o rotor de teste e o estator. Para tanto, sugere-se realizar ensaios de rotor bloqueado de 360° mais apurados e com maior resolução que os empregados neste trabalho.

A equalização da temperatura entre rotor e estator das peças testadas poderia influenciar na detecção de defeitos. Para isso, recomenda-se aprofundar na avaliação do efeito da temperatura no ERB, tanto na parte mecânica quanto na parte elétrica.

Sugere-se acrescentar ao ERB, a detecção de defeitos por curto-circuito contra terra, por meio do monitoramento direto das correntes de fase, neutro e terra, ou por meio de relé diferencial de corrente residual, ligado aos enrolamentos do estator.

Recomenda-se avaliar o ERB para análise da conformidade do motor (estator com rotor de serviço acoplado) em linha de produção

anterior ao fechamento hermético do compressor (pré-montagem). Tal procedimento poderia dar indicações ainda mais próximas das condições finais de operação, evitando o sucateamento de compressores selados, decorrente de estatores ou rotores defeituosos. Os resultados da pesquisa evidenciaram que a corrente do ERB seria suficiente para determinar a conformidade da peça, entretanto, tal indicação também requer análise futura mais rigorosa.

5.3.3 Outras sugestões

Especificar quais são os níveis e condições de avaliação adequados para determinados tipos de estatores, considerando suas características elétricas e construtivas, é um trabalho importante que requer pesquisas adicionais. Os resultados daí advindos não serão úteis apenas para ensaios de DP, mas também para ensaios elétricos amplamente empregados como de rotina no processo de fabricação de estatores, por exemplo, *hipot* e surto. Estabelecer corretamente os critérios de aceitação/rejeição poderiam otimizar e melhorar, ainda, a capacidade dos sistemas de teste atuais reduzindo erros de avaliação, diferenciando quando variação de processo e quando produto defeituoso.

Os limites de aceitação nos testes são elementos estatísticos críticos, não importantes apenas para critérios de tipo passa não-passa, mas também como ferramenta para avaliar a qualidade e variabilidade do processo produtivo. Nesse aspecto, o registro e análise detalhada dos resultados dos ensaios disponíveis e de novos que possam fornecer indicações sensíveis da variação do processo, poderiam ser objeto de outros estudos para correlacionar defeitos que poderiam ser decorrentes do manuseio, em ou entre as diferentes etapas de fabricação.

6 REFERÊNCIAS

- [1] STONE, G. C.; BOULTER, E. A.; CULBERT, I.; DHIRANI, H. **Electrical Insulation for Rotating Machines - Design, Evaluation, Aging, Testing, and Repair**. Piscataway, NJ: John Wiley & Sons, Inc., 2004.
- [2] FRANÇOIS Arago. In: **Encyclopædia Britannica Online Academic Edition**. Encyclopædia Britannica Inc, 2012. Disponível em: <<http://www.britannica.com/EBchecked/topic/31875/Francois-Arago>>. Acesso em: 29 maio 2012.
- [3] MICHAEL Faraday. In: **Encyclopædia Britannica Online Academic Edition**. Encyclopædia Britannica Inc., 2012. Disponível em: <<http://www.britannica.com/EBchecked/topic/201705/Michael-Faraday>>. Acesso em: 29 maio 2012.
- [4] TESLA, N. A New System of Alternate Current Motors and Transformers. **American Institute of Electrical Engineers, Transactions of the**. Jul. 1888. Vol. V, no. 10, pp. 308 –327.
- [5] NEIDHÖFER, G.. **Early Three-Phase Power, Winner in the development of polyphase AC**. 2007. Disponível em: <<http://www.ieee.org/organizations/pes/public/2007/sep/peshistory.html>> Acesso em 29 maio 2012.
- [6] GE-GEVISA S.A. **GE-GEVISA S.A.**. 2012. Disponível em: www.geindustrial.com.br. Acesso em 29 maio 2012.
- [7] NAGENGAST, B. A. **History of sealed refrigeration systems**. ASHRAE JOURNAL, 1996. No. January 1996, pp. S37–S48.
- [8] SCHLICKMANN, D. G. **Aprimoramento e caracterização do comportamento metrológico de uma bancada de ensaios de partida e de tombamento de compressores de refrigeração**. 142 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Programa de pós-graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2012.
- [9] TESLA MEMORIAL SOCIETY OF NEW YORK, Tesla induction motor. **Tesla Memorial Society of New York**. 29-May-2012. Disponível em: <www.teslasociety.com>. Acesso em: 31 maio 2012.
- [10] EMBRACO. **EMBRACO**. Disponível em: <<http://www.embraco.com>>. Acesso: 25-May-2012].

- [11] ANDERSEN, P. S. **Modelling and analysis of asynchronous and synchronous torques in split-phase induction machines.** 180 f. Teses (PhD) - The Department of Electronics and Electrical Engineering, University of Glasgow, Glasgow, Scotland. United Kingdom., 2008.
- [12] BAJEC, P.; FISER, R.; AMBROZIC, V.; NASTRAN, J.; **Detection of induction motor squirrel cage asymmetry using dynamic torque spectrum analysis.** 4th IEEE International Symposium on Diagnostics for Electric Machines, Power Electronics and Drives, 2003. SDEMPED 2003, 2003, pp. 110 – 114.
- [13] PACHECO, A. L. S., **Desenvolvimento de sistema para medir a resistência de enrolamento em motores de compressores energizados.** 180 f. Dissertação (Mestrado em Metrologia Científica e Industrial) – Programa de pós-graduação em Metrologia Científica e Industrial, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2007.
- [14] HENKLEIN, P. **Análise de ensaios de desempenho de compressores herméticos durante o transitório.** 136 f. Dissertação (Mestrado em Metrologia Científica e Industrial) – Programa de pós-graduação em Metrologia Científica e Industrial, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2006.
- [15] SCUSSEL, J. N. **Propostas de ações para reduzir o tempo demandado por ensaio de desempenho de compressores heméticos.** 152 f. Dissertação (Mestrado em Metrologia Científica e Industrial) – Programa de pós-graduação em Metrologia Científica e Industrial, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2006.
- [16] GIESEL, T. **Estudo e projeto de motores de alta velocidade para aplicação em compressores herméticos.** 132 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Programa de pós-graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2007.
- [17] DISCONZI, F. P. **Análise numérica da transferência de calor no interior de cilindros de compressores alternativos de refrigeração doméstica.** 127 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Programa de pós-graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2011.
- [18] PIZARRO R., R. A. **Influência do óleo lubrificante na transferência de calor em um compressor hermético**

- alternativo.** 161 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Programa de pós-graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2007.
- [19] HAAS D. A.; DESCHAMPS C. J. **Um modelo numérico para prever a distribuição de temperatura em compressores alternativos.** Mecânica Computacional. Nov. 2012. Vol. XXX, pp. 2497–2512.
- [20] VEINOTT, C. G. **Theory and design of small induction motors.** New York, NY. McGraw-Hill, 1959.
- [21] RUTHES, J. R. **Análise dos torques síncronos em motores de indução monofásicos.** 92 f. Dissertação, (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Programa de pós-graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2008.
- [22] HANSELMAN, D. **Brushless Permanent Magnet Motors Design.** Second Edition. Lebanon, Ohio. Magna Physics Publishing, 2006.
- [23] WEG S. A. **Motores elétricos: Guia de especificação.** WEG. Jaraguá do Sul - SC, 2012.
- [24] KCEL Motores e Fios Ltda. **Manual de motores elétricos.** Distrito Federal. Nova, 2008.
- [25] EMBRACO. **Componentes elétricos dos compressores Embraco.** 4th ed. Joinville, SC, 2009.
- [26] BEATY, W.; KIRTLEY, J. **Electric motor handbook.** USA. McGraw-Hill, 1998.
- [27] BARR H.; BONNETT A.; YUNG, C. **Understanding the design of stators and rotors of squirrel cage induction motors.** 55th IEEE Petroleum and Chemical Industry Technical Conference, 2008. PCIC 2008, 2008, pp. 1–11.
- [28] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, ABNT. **NBR 5457:1980** : Electrotécnica e eletrônica : Máquinas girantes : terminologia. 30-Dec-1980. Disponível em: <<http://abntcolecao.com.br/norma.aspx?ID=546>>. Acesso em: 15 ago. 2012.
- [29] EGGERT, W. v. **Ruído magnético em motores de indução monofásicos com rotor de gaiola.** 128 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Programa de pós-graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2007.

- [30] FITZGERALD, A. E.; KINGSLEY, C. J.; UMANS, S. D. **Máquinas elétricas com introdução à eletrônica de potência**. 6 ed. Porto Alegre. Bookman, 2008.
- [31] YEADON W. H.; YEADON A. W. **Handbook of Small Electric Motors**. New York. McGraw-Hill, 2001.
- [32] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, **NBR 17094-2:2008** : Máquinas elétricas girantes : Motores de indução : Parte 2 : Monofásicos. Disponível em: <<http://abntcolecao.com.br/norma.aspx?ID=28598#>>. Acesso em: 13 ago. 2012.
- [33] INMETRO/CICMA/SEPIN, **Sistema internacional de unidades : SI**. 9 ed. Rio de Janeiro, RJ: Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia (INMETRO), 2012.
- [34] KEYES, C. **Electric motors. Energy efficiency reference guide**. Canada. CEA Technologies Inc. (CEATI), 2007.
- [35] COWERN, E. **Cowern Papers. Baldor Motors and Drives**. EMS Inc., Apr-1999.
- [36] KUPHALDT, T. R. Tesla polyphase induction Motors. **Tesla polyphase induction Motors**. 25-May-2012. Disponível em: <http://www.allaboutcircuits.com/vol_2/chpt_13/7.html>. Acesso em: 31 maio 2012.
- [37] BUTTON, C. T. **Single-phase motor theory: a correlation of the cross-field and revolving-field concepts**. Electrical Engineering. 1941. Vol. 60, no. 6, pp. 507–512.
- [38] LIMA, L. C. A. **Controle da alimentação elétrica para redução do tempo demandado por ensaios de desempenho de compressores e avaliação da influência da qualidade da energia elétrica nos resultados dos ensaios**. 211 p. Dissertação (Mestrado em Metrologia Científica e Industrial) – Programa de pós-graduação em Metrologia Científica e Industrial, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2010.
- [39] CHAPMAN, S. J. **Electric Machinery Fundamentals**. 4 ed. New York, NY. McGraw-Hill, 2005.
- [40] MORRILL, W. J. **The Revolving Field Theory of the Capacitor Motor**. American Institute of Electrical Engineers, Transactions of the. 1929. April, Vol. 48, no. 2, pp. 614 –629.
- [41] VEINOTT, C. G. **Theory and design of small induction motors**. New York, NY. McGraw-Hill, 1959.
- [42] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, **NBR 5383-2:2007** : Máquinas elétricas girantes : Parte 2 : Motores de indução monofásicos : Ensaios. Disponível em:

- <<http://abntcolegao.com.br/norma.aspx?ID=546>>. Acesso em: 28 sep. 2012.
- [43] NEMA, **MG 11-1977 (R1997, R2001, R2007)**: Energy Management Guide for Selection and Use of Single-Phase Motors. Rosslyn, VA. USA. National Electrical Manufacturers Association, 2007.
 - [44] PEREIRA, I. S. **Medição de potência elétrica em motores brushless acionados por conversor de frequência**. 199 p. Dissertação (Mestrado em Metrologia Científica e Industrial) – Programa de pós-graduação em Metrologia Científica e Industrial, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2010.
 - [45] Institute of Electrical and Electronics Engineers, IEEE. **IEEE Std 114-2010 (Revision of IEEE Std 114-2001)** : Standard Test Procedure for Single-Phase Induction Motors, pp. 1–44, 2010.
 - [46] VIEIRA, Rodrigo Padilha. **Servocontrole de velocidade aplicado a motores de indução monofásicos sem sensores mecânicos**. 113 f. Dissertação (Mestrado) - Programa de pós-graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Santa Maria, RS, 2008.
 - [47] BOGLIETTI, A.; CAVAGNINO, A.; FERRARIS, L.; LAZZARI, M. **Skin effect experimental validations of induction motor squirrel cage parameters**. COMPEL: The International Journal for Computation and Mathematics in Electrical and Electronic Engineering, Sep. 2010. Vol. 29, no. 5, pp. 1257–1265.
 - [48] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, ABNT. **NBR IEC 60085:2012**: Isolação elétrica - Avaliação térmica e designação, 2012. Disponível em: <<http://abntcolegao.com.br/norma.aspx?ID=80915>>. Acesso em: 29 jan. 2013.
 - [49] PRE-FORMED Windings. In **Pre-Formed Windings**, 2012. Disponível em: <<http://www.preformed.co.uk/tabid/498/default.aspx>>. Acesso em: 07 nov. 2012.
 - [50] WEG S. A. **Motores elétricos: guia de especificação**. WEG, Jaraguá do Sul - SC, 2012.
 - [51] SILVA, G. C., **Descargas parciais estimuladas por raios-X contínuo e pulsado em materiais dielétricos: similaridades e diferenças**. Teses (Doutorado) - Programa de pós-graduação em Engenharia, Universidade Federal de Paraná, Curitiba, 2005.
 - [52] BOGH, D.; COFFEE, J.; STONE, G.; CUSTODIO, J. **Partial-discharge-inception testing on low-voltage motors**. IEEE

- Transactions on Industry Applications, vol. 42, no. 1, pp. 148 – 154, feb. 2006.
- [53] VOGES. **Manual de motores elétricos**. Caixas do Sul, RS, Grupo Voges, 2011.
- [54] BONNETT, A.; SOUKP, G. **Causes et analyse des défaillances de stators et de rotors des moteurs à induction à courant alternatif**. Manuel technique EASA - Fiche technique, 2003. Vol. 31, no. 1, pp. TN31-1 – TN31-22.
- [55] International Electrotechnical Commission, IEC. **IEC 60664-1:2007** : Insulation coordination for equipment within low-voltage systems - Part 1 : Principles, requeriments and tests. Second edition, Apr. 2007. 103 p.
- [56] STRANGES, M. K.; STONE, G. C.; BOGH, D. L. **New specs for ASD motors**. IEEE Industry Applications Magazine, 2007. Vol. 13, no. 1, pp. 37-42.
- [57] SIDDIQUE, A.; YADAVA, G. S.; SINGH, B. **A review of stator fault monitoring techniques of induction motors**. IEEE Transactions on Energy Conversion. Mar. 2005. Vol. 20, no. 1, pp. 106 – 114.
- [58] MARTÍNEZ, A. M. P. **Estudo de métodos de detecção de curto-circuito entre espiras em estatores de motores de indução trifásicos de baixa tensão**. 89 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Programa de pós-graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2008.
- [59] IEEE. **IEEE Std 100-2000** : The Authoritative Dictionary of IEEE Standards Terms. Seventh Edition, 2000.
- [60] MELERO, M. G.; CABANAS, M. F.; ROJAS, C. G.; ORCAJO, A.; CANO, J. M.; SOLARES, J. **Study of an induction motor working under stator winding inter-turn short circuit condition**. 4th IEEE International Symposium on Diagnostics for Electric Machines, Power Electronics and Drives, SDEMPED 2003, 2003, pp. 52-57.
- [61] WEG S. A. **Danos em enrolamentos. Motores monofásicos**. Feb-2012. Disponível em: <weg.net>. Acesso em 30 nov. 2012.
- [62] KARAVASILIS, R. G. **Estudo de motores acionados por conversores de frequência e influências no sistema isolante**. 148 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica). – Programa de pós-graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2008.

- [63] WEG EQUIPAMENTO ELÉTRICOS S. A. **Motores de indução alimentados por inversores de frequência PWM. Guia Técnico.** Nov-2009. Disponível em: <www.weg.net>. Acesso em: 10 jul. 2012.
- [64] IEC. **IEC 60034-1:2004** : Rotating electrical machines : Part 1 : Rating and performance, 2004. Eleventh edition. 103 p.
- [65] KAUFHOLD, M.; SCHAFER, K.; BAUER, K.; BETHGE, A.; RISSE, J. **Interface phenomena in stator winding insulation - challenges in design, diagnosis, and service experience.** IEEE Electrical Insulation Magazine, 2002. Vol. 18, no. 2, pp. 27 –36.
- [66] TALLAM, R. M.; LEE, S. B.; STONE, G.; KLIMAN, G. B.; YOO, J.; HABETLER, T. G.; HARLEY, R. G. **A survey of methods for detection of stator related faults in induction machines.** 4th IEEE International Symposium on Diagnostics for Electric Machines, Power Electronics and Drives, 2003. SDEMPED 2003, 2003, pp. 35 – 46.
- [67] GRADIN L. P.; OLSON, D. **Research to correct misconceptions regarding significance of PI and IR testing of motors.** Nuclear Science Symposium and Medical Imaging Conference, 1994., 1994 IEEE Conference Record, 1994. Vol. 3, pp. 1106 –1110.
- [68] MEURER, E. J. **Estudo de perdas magnéticas interlaminares em máquinas elétricas.** 122 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Programa de pós-graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2005.
- [69] IAMAMURA, B. A. T. **Desenvolvimento de um dispositivo magnético para teste de estatores.** 102 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Programa de pós-graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2008.
- [70] HORNBURG, I.; ARINS, M. R. B. **Manual de treinamento estatores MIDIS/2009.** Embraco - UGB Estatores Midis, Joinville, SC, 2009.
- [71] PACHECO, A. L. S. **Proposição de novas formas de ensaio para controle de qualidade e diagnóstico de falhas na produção de motores elétricos.** Qualificação de Doutorado – Programa de pós-graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2012.
- [72] PACHECO, A. R. **Arquitetura modular de painéis de testes elétricos de estatores indutivos.** 185 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia da Produção) – Programa de pós-graduação em

- Engenharia da Produção, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2012.
- [73] MARCON, V.; ZIMMERMANN, J. **Sistema de teste em estatores bobinados**. 2000. Disponível em: <<http://ecatalog.weg.net/files/wegnet/WEG-estatores-bobinados-artigo-tecnico-portugues-br.pdf>>. Acesso em: 19 jul. 2012.
 - [74] MacLACHLAN, D. **Getting back to the basics of electrical measurements**. Keithley Instruments, Inc., 2011.
 - [75] IEEE. **IEEE Std 43-2000** : IEEE Recommended Practice for Testing Insulation Resistance of Rotating Machinery, 27 p., 2000.
 - [76] IEEE. **ANSI C50.32-1976 and IEEE Std 117-1974 (Reaffirmed 1984) (Revision of IEEE Std 117-1956)** : IEEE Standard Test Procedure for Evaluation of Systems of Insulating Materials for Random-Wound AC Electric Machinery,” pp. i–22, 1974.
 - [77] STONE G. C. **Recent important changes in IEEE motor and generator winding insulation diagnostic testing standards**. IEEE Transactions on Industry Applications, Feb. 2005.Vol. 41, no. 1, pp. 91 – 100.
 - [78] GUPTA, B. K.; STONE, G. C.; STEIN, J. **Stator winding hipot (high potential) testing**. IEEE Electrical Insulation Conference, 2009. EIC 2009, 2009, pp. 409 –413.
 - [79] BAKER Instruments. **Users manual. Digital Surge/DC Hipot/Resistance tester. Models D85R**. SKF Group Company, 08 dec. 2009.
 - [80] MILANO, Shaun. **Allegro Hall-Effect Sensor ICs (296065-AN)**. Allegro MicroSystems, LLC, 2013.
 - [81] ABNT. **NBR 5383-2:2007** : Máquinas elétricas girantes : Parte 2 : Motores de indução monofásicos : Ensaios. 28-Sep-2012. Disponível em: <<http://abntcolecao.com.br/norma.aspx?ID=546>>. Acesso em: 28 sep. 2012.
 - [82] IEC. **BS EN 60270:2001 - IEC 60270:2001** : High-voltage test techniques - Partial discharge measurements. Mar. 2001. 51 p.
 - [83] KUFFEL, E.; ZAENGL, W.; KUFFEL, J. **High voltage engineering. Fundamentals**. Second edition. Oxford, Great Britain. Newnes, 2000.
 - [84] FLORKOWSKA, B.; ROEHRICH, J.; ZYDRON P.; FLORKOWSKI, M. **Partial discharge characteristics of enameled wire of electric machine winding under exploitation stresses**. 2010 10th IEEE International Conference on Solid Dielectrics (ICSD), 2010, pp. 1 –4.

- [85] WEG Indústrias S.A. - Transformadores. **Informações Técnicas DT-11. Características e especificações de transformadores de distribuição e força.** WEG, 2009.
- [86] JUNIOR, J. T. **Medição de descargas parciais.** 2000. Disponível em: <<http://www.eletrica.ufpr.br/piazza/ensaios/meddp1.pdf>> Acesso em 21 maio 2012.
- [87] IEEE. **IEEE Std 1434-2000** : IEEE Trial-Use Guide to the Measurement of Partial Discharges in Rotating Machinery. 2000.
- [88] BARTNIKAS, R. **Partial discharges. Their mechanism, detection and measurement.** IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, oct. 2002. Vol. 9, no. 5, pp. 763 – 808.
- [89] ABNT. **NBR 6940:1981** : Técnicas de ensaios elétricos de alta tensão – Medição de descargas parciais. Nov-1981. Disponível em: <<http://abntcolecao.com.br/norma.aspx?ID=9088#>>. Acesso em 30 jan. 2013.
- [90] Stone, G. C. Partial discharge. **XXV. Calibration of PD measurements for motor and generator windings : why it can't be done.** IEEE Electrical Insulation Magazine, 1998. Vol. 14, no. 1, pp. 9–12,.
- [91] STONE G. C.; WARREN, V. **Effect of manufacturer, winding age and insulation type on stator winding partial discharge levels.** IEEE Electrical Insulation Magazine, 2004. Vol. 20, no. 5, pp. 13–17.
- [92] MASON, J. H. **Enhancing the significance of PD measurements.** IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 1995. Vol. 2, no. 5, pp. 876–888.
- [93] KREUGER, F. H.; GULSKI, E.; KRIVDA, A. **Classification of partial discharges.** IEEE Transactions on Electrical Insulation, 1993. Vol. 28, no. 6, pp. 917–931.
- [94] WELSCH, A. **Praktikum im Fach Hochspannungstechnik: Messung von Teilentladungen.** 31-May-2007. Disponível em: <<http://homepages.fh-regensburg.de/~wea39402/>> Acesso no: 10 out. 2012.
- [95] HASHMI, G. M. **Partial discharge detection for condition monitoring of covered-conductor overhead distribution networks using rogowski coil.** Dissertation for the degree of Doctor of Science in Technology – Departament of Electrical Engineering, Helsinki University of Technology, Espoo, Finland, 2008.
- [96] LEMKE, E. **Guide for PD measurements in Compliance to IEC60270.** CIGRE WG D1.33, 2008.

- [97] CARVAJAL M., F. A. **Diagnóstico en línea de motores de gran capacidad mediante la detección de descargas parciales utilizando técnicas de banda ultra ancha (UWM)**. Tesis para obtener el grado de Maestro em Ciencias – Escuela Superior de Ingeniería Mecánica e Eléctrica, Instituto Politécnico Nacional, México D.F., México, 2003.
- [98] EDIN, H. **Partial discharges studied with variable frequency of the applied voltage**. Teses PhD, Kungl Tekniska Högskolan, Stockholm, Sweden, 2001.
- [99] MORSHUIS P. H. F.; SMIT, J. J. **Partial discharges at DC voltage: their mechanism, detection and analysis**. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2005. Vol. 12, no. 2, pp. 328–340.
- [100] Paoletti G. J.; Golubev, A. **Partial discharge theory and technologies related to medium-voltage electrical equipment**. IEEE Transactions on Industry Applications, 2001. Vol. 37, no. 1, pp. 90–103, 2001.
- [101] KÜCHLER, A. **Hochspannungstechnik: Grundlagen - Technologie - Anwendungen**, 2 ed., vollst. bearb. u. erw. Aufl. Berlin, Germany: Springer-Verlag, 2005.
- [102] ZHAO, X. F.; YAO, X.; GUO, Z. F.; WANG, Y. Y.; LI, J. H.; LI, Y. M. **Partial discharge characteristics and mechanism in voids at impulse voltages**. Meas. Sci. Technol., vol. 22, no. 3, p. 035704, mar. 2011.
- [103] ABNT, **NBR 7294:2010**: Fios e cabos elétricos - Ensaios de descargas parciais. 10-Nov-2010. Disponível em: <<http://abntcolecao.com.br/norma.aspx?ID=80915>> Acesso em: 30 jan. 2013.
- [104] NAZEMI, A. **Electrical Power Engineering. Power Lab II - Experiment: Partial discharges**. University of Technology Darmstadt, 2011.
- [105] AMORIM, H.; LEVY, A.; TOMAZ, A.; RODRIQUES, J. A. P.; SANZ, J. **Medições de descargas parciais no campo - Aspectos práticos em geradores e motores**. CIGRÉ, maio 2009.
- [106] INMETRO. **Vocabulário Internacional de Metrologia: conceitos fundamentais e gerais de termos associados (VIM 2012)**. Duque de Caxias, RJ, 2012.
- [107] MUHR, M.; SCHWARZ, R.; PACK, S.; KOERBLER, B. **Unconventional partial discharge measurement [electrical insulation evaluation]**. Annual Report Conference on Electrical

- Insulation and Dielectric Phenomena, 2004. CEIDP '04, 2004, pp. 430–433, 2004.
- [108] VAN BRUNT, R. J. **Stochastic properties of partial-discharge phenomena**. IEEE Transactions on Electrical Insulation. Vol. 26, no. 5, pp. 902–948, 1991.
- [109] DINIZ, F. C. C. B. **Supressão de ruído, detecção e classificação de sinais de descargas parciais em transformadores de potência**. Teses de Mestrado em Ciências em Engenharia Elétrica – Programa de pós-graduação em Engenharia, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ, 2005.
- [110] Tai, C.-C.; Su, C.-C.; Hsieh, J.-C.; Wang, C.-T.; Huang, T.-C.; Chen, C.-Y.; Lin, Y.-S.; Lai, J.-H. **A simple partial discharge detector for low-voltage rotating electrical machines**. 7th International Conference on Power Electronics. ICPE '07, 2007, pp. 310–315, 2007.
- [111] IEEE. **IEEE Unapproved Draft Std PC37.301/D5, Sep 2008** : IEEE Draft Standard High Voltage Switchgear (above 1000 V) Tests Techniques - Partial Discharge measurements, 2009.
- [112] ARGÜESO, M.; ROBLES, G.; SANZ, J. **Implementation of a Rogowski coil for the measurement of partial discharges**. Review of Scientific Instruments, vol. 76, no. 6, pp. 065107–065107–7, 2005.
- [113] MACHADO, F. L. B. **Desenvolvimento de padrões de verificação para medições de tensão e corrente aplicadas ao controle da operação de sistemas de transmissão de energia elétrica**. 117 f. Dissertação (Mestrado em Metrologia Científica e Industrial) – Programa de pós-graduação em Metrologia Científica e Industrial, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2009.
- [114] KARADY, G. G.; OLIVA, J. R.; DOMITZ, S.; MEKETA, R. **Advanced digital instrumentation for partial-discharge measurement**. Electric Power Systems Research, vol. 25, no. 3, pp. 191–198, 1992.
- [115] BLOCK. **Transformatoren-Elektronik GmbH: Service: Glossar**. Disponível em <http://www.block-trafo.de/de_DE/service/glossary/>. Acesso em: 02 sep. 2013.
- [116] OMICRON. **MPD 500 - Partial Discharge Measurement, Partial Discharge Test**. Disponível em: <<http://www.omicron.at/en/products/pro/primary-testing->

- diagnosis/partial-discharge/mpd500-pd-measurement/>. Acesso em: 02 sep. 2013.
- [117] ELEKTRO.NET. **Genaue Analyse von Teilentladungen**. Disponível em: <<http://www.elektro.net/11108/genaue-analyse-von-teilentladungen/>>. Acesso em: 02 sep. 2013.
- [118] Cavallini, A.; Montanari, G. C.; Puletti, F. **A novel method to locate PD in polymeric cable systems based on amplitude-frequency (AF) map**. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, vol. 14, no. 3, pp. 726–734, 2007.
- [119] FILHO, V. S. **Imagens de defeitos por descarga parcial estimulada por raios X pulsado em materiais dielétricos poliméricos**. Teses (Doutorado em Engenharia) – Programa Interdisciplinar de pós-graduação em Engenharia, Universidade Federal de Paraná, Curitiba, 2000.
- [120] NAIDU, M. S.; KAMARAJU, V. **High voltage engineering**. 2 ed. New York, NY: McGraw-Hill, 1996.
- [121] OKUBO, H.; HAYAKAWA, N.; MONTANARI, G. C. **Technical Development on Partial Discharge Measurement and Electrical Insulation Techniques for Low Voltage Motors Driven by Voltage Inverters**. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, vol. 14, no. 6, pp. 1516–1530, 2007.
- [122] KAUFHOLD, M.; BORNER, G.; EBERHARDT, M.; SPECK, J. **Failure mechanism of the interturn insulation of low voltage electric machines fed by pulse-controlled inverters**. IEEE Electrical Insulation Magazine, vol. 12, no. 5, pp. 9–16, 1996.
- [123] Kaufhold, M.; Aninger, H.; Berth, M.; Speck, J.; Eberhardt, M. **Electrical stress and failure mechanism of the winding insulation in PWM-inverter-fed low-voltage induction motors**. IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 47, no. 2, pp. 396–402, 2000.
- [124] MÜLLER, K. **Entwicklung und Anwendung eines Messsystems zur Erfassung von Teilentladungen bei an Frequenzumrichtern betriebenen elektrischen Maschinen**. Teses, Universität Duisburg-Essen, Duisburg-Essen, Deutschland, 2003.
- [125] STONE, G. C.; CAMPBELL, S. R.; SUSNIK, M. **New tools to determine the vulnerability of stator windings to voltage surges from IFDs**. Electrical Insulation Conference and Electrical Manufacturing amp; Coil Winding Conference, 1999. Proceedings, pp. 149–153, 1999.

- [126] CAMPBELL, S. R.; STONE, G. C. **Examples of stator winding partial discharge due to inverter drives**. Conference Record of the 2000 IEEE International Symposium on Electrical Insulation, pp. 231 –234, 2000.
- [127] IEC. **IEC 60664-4:2005** : IEC Insulation coordination for equipment within low-voltage systems - Part 4 : Consideration of high-frequency voltage stress. 2 ed., 144 p., 2005.
- [128] IEEE. **IEEE Std 3-1982** : IEEE Recommended Practice in the Selection of Reference Ambient Conditions for Test Measurements of Electrical Apparatus, 1982.
- [129] SOLTANI, R.; DAVID, E.; LAMARRE, L. **Study on the effect of humidity on dielectric response and partial discharges activity of machine insulation materials**. IEEE Electrical Insulation Conference, EIC 2009, pp. 343 –347, 2009.
- [130] Guastavino, F.; Torello, E.; Dardano, A.; Coletti, G. **PD Pattern dependence on relative humidity in twisted pairs**. Annual Report Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena. CEIDP 2008, 2008, pp. 421 –424, 2008.
- [131] NAPRASERT, S.; CHONGCHAIKIT, S.; PUTHWATTANA, S. **The Effect of Humidity on Partial Discharge Measurement**. 8th International Conference on Properties and applications of Dielectric Materials, pp. 57 –60, 2006.
- [132] KIKUCHI, Y.; MURATA, T.; UOZUMI, Y.; FUKUMOTO, N.; NAGATA, M.; WAKIMOTO, Y.; YOSHIMITSU, T. **Effects of ambient humidity and temperature on partial discharge characteristics of conventional and nanocomposite enameled magnet wire**. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, vol. 15, no. 6, pp. 1617 –1625, 2008.
- [133] ABNT, **NBR NM 60317-8:2007** : Especificações para tipos particulares de fios para enrolamentos : Parte 8: Fio de cobre esmaltado de seção circular, à base de poliéster modificado, classe termica 180 (IEC 60317-8:1997, MOD), Jan-2007. Disponível em: <<http://abntcolecacao.com.br/norma.aspx?ID=9088#>>. Acesso em: 30 jan. 2013.
- [134] JANSEN, J. U. **Síntese e caracterização de verniz eletroisolante para cura dual uv/térmica**. Teses de Doutorado em Ciências na área de Tecnología Nuclear, IPEN-USP, São Paulo, SP, 2005.
- [135] Fliegel D.; Günther, D. **Electrical characteristics of a millisecond pulsed glow discharge**. Spectrochimica Acta Part B: Atomic Spectroscopy, vol. 63, no. 6, pp. 630–637, Jun. 2008.

- [136] GOMES, M. P.; SISMANOGLU, B. N.; AMORIM, J. **Characterization of microhollow cathode discharges**. Brazilian Journal of Physics, vol. 39, no. 1, pp. 25–30, mar. 2009.
- [137] DIETER, K. **High-voltage insulation technology: textbook for electrical engineers**. Braunschweig, Vieweg, 1985.
- [138] MELFI, M.; SUNG, A. M. J.; BELL, S.; SKIBINSKI, G. L. **Effect of surge voltage risetime on the insulation of low-voltage machines fed by PWM converters**. IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 34, no. 4, pp. 766–775, 1998.
- [139] WRIGHT, M. T.; YANG, S. J.; McLEAY, K. **General theory of fast-fronted interturn voltage distribution in electrical machine windings**. Electric Power Applications, IEE Proceedings B, vol. 130, no. 4, pp. 245–256, 1983.
- [140] PERPIÑÁN, O.; SÁNCHEZ-URÁN, M. A.; ÁLVAREZ, F.; ORTEGO, J.; GARNACHO, F. **Signal analysis and feature generation for pattern identification of partial discharges in high-voltage equipment**. Electric Power Systems Research, vol. 95, pp. 56–65, Feb. 2013.
- [141] BEATY, W.; KIRTLEY, J. **Electric motor handbook**. USA, McGraw-Hill, 1998.
- [142] KAUFHOLD, M. **Failure mechanism of the interturn insulation of low voltage electric machines fed by pulse controlled inverters**. Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena, 1995. Annual Report, pp. 254 –257. 1995.
- [143] KAUFHOLD, M.; SCHAFFER, K.; BAUER, K.; BETHGE, A.; RISSE, J. **Interface phenomena in stator winding insulation - challenges in design, diagnosis, and service experience**. IEEE Electrical Insulation Magazine, vol. 18, no. 2, pp. 27 –36, Apr. 2002.
- [144] YANG, J.; KANG, T.; KIM, B.; LEE, S.-B.; YOON, Y.-W.; KANG, D.; CHO, J.; KIM, H. **Experimental evaluation of using the surge PD test as a predictive maintenance tool for monitoring turn insulation quality in random wound AC motor stator windings**. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, vol. 19, no. 1, pp. 53–60, 2012.
- [145] FENGER, M.; STONE, G.; CAMPBELL, S. **Partial discharges on low voltage stator windings subjected to voltage surges from adjustable speed drives**. Power Electronics, Machines and Drives, 2002. International Conference on (Conf. Publ. No. 487), pp. 298 – 302, 2002.

- [146] SCHEMMEL, F.; BAUER, K.; KAUFHOLD, M. **Reliability and statistical lifetime- prognosis of motor winding insulation in low-voltage power drive systems**. IEEE Electrical Insulation Magazine, vol. 25, no. 4, pp. 6–13, 2009.
- [147] EMBRACO. **Embraco promove três modelos de compressores**. Bola Preta - A Revista do Refrigерista, vol. Ano XXVII, no. 108, dec. 2011.
- [148] EMBRACO. Catálogo Eletrônico de Produtos. Disponível em: <<http://www.embraco.com/catalog/Compressors.aspx?idProduto=324587&idCapacidade=1418156&idOleo=36&tipoTeste=ASHRAE32&aplicacao=6&frequencia=60&capacidadeFuncionamento=&paginaAnterior=Results-Compressors.aspx?m=Model|qtdregistrospagina=20|p=|s=C|model=EMYe|hpmin=|hpmax=|efficiencymmin=0|efficiencymax=3|capacit ymin=20|capacitymax=6754|quickSearch=>>>. Acesso em: 20 sep. 2012.
- [149] AGILENT. **4294A Precision Impedance Analyzer, 40 Hz to 110 MHz**. Disponível em: <<http://www.home.agilent.com/pt/pd-1000000858%3Aeapsg%3Apro-pn-4294A/precision-impedance-analyzer-40-hz-to-110-mhz?&cc=BR&lc=por>>. Acesso em: 21 sep. 2013.
- [150] NATIONAL INSTRUMENTS. **NI LabVIEW. Mais produtividade para engenheiros e cientistas. National Instruments**. Ambiente gráfico de desenvolvimento de sistemas LabVIEW. Disponível em: <<http://www.ni.com/labview/pt/>>. Acesso em: 23 sep. 2013.
- [151] SOUZA NETO B. M. de,. **Desenvolvimento de uma bancada para medição automatizada de potência mecânica em motores elétricos de alta rotação e baixo torque**. Dissertação (Mestrado em Metrologia Científica e Industrial) – Programa de pós-graduação em Metrologia Científica e Industrial, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2009.
- [152] HONEYWELL. **Torque transducer - reaction - minitature - model QWFK-8M**, Honeywell - Sensotec. Disponível em: <<https://measurementsensors.honeywell.com/Pages/Product.aspx?pid=QWFK-8M>>. Acesso em: 18 sep. 2013.
- [153] LEM. **LA 25-NP.pdf**. Disponível em: <<http://www.lem.com/docs/products/la%2025-np.pdf>>. Acesso em: 18 sep. 2013.
- [154] GEFRA. **GQ - Monophase Solid State Relay with logic control - Components and Automation**, GEFRA. Disponível

- em: <[http://www.gefran.com/en/product_categories/17-solid-state-relays\(rc94\)/products/237-gq-monophase-solid-state-relay-with-logic-control](http://www.gefran.com/en/product_categories/17-solid-state-relays(rc94)/products/237-gq-monophase-solid-state-relay-with-logic-control)>. Acesso em: 18 sep. 2013.
- [155] HONEYWELL. **Instruments - Inline Amplifiers - Plastic or Die Cast - Model UV**, Honeywell - Sensotec. Disponível em: <<https://measurementsensors.honeywell.com/Pages/Product.aspx?category=PRODUCTTYPES-INSTRUMENTS-INLINEAMPLIFIERS-PlasticorDieCast&cat=Honeywell&pid=UV&SortBy=&Asc=&rank=0>>. Acesso em: 18 sep. 2013.
- [156] NI. **PCI-4451/4452/4453/4454 User Manual - 321891b.pdf**. Mar-2000. Disponível em: <<http://www.ni.com/pdf/manuals/321891b.pdf>>. Acesso em: 18 sep. 2013.
- [157] AGILENT. **Product overview. Agilent 34970A Data Acquisition / Switch Unit Family**. Agilent Technologies, Jan-2012. Disponível em: <<http://www.home.agilent.com>>. Acesso em: 20 sep. 2013.
- [158] DEMAY, M. B. **Desenvolvimento de sistemas de medição de frequência rotacional em compressores herméticos**. 153 f. Dissertação (Mestrado em Metrologia Científica e Industrial) – Programa de pós-graduação em Metrologia Científica e Industrial Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2008.
- [159] ABNT. **NBR 17094-2:2008**: Máquinas elétricas girantes: Motores de indução: Parte 2: Monofásicos. 13-Aug-2012. Disponível em: <<http://abntcolecao.com.br/norma.aspx?ID=28598#>>. Acesso em: 13 ago. 2012.
- [160] ALBERTAZZI, A.; SOUZA, A. R. **Fundamentos de metrologia científica e industrial**. Barueri, SP: Manole, 2008.

APÊNDICE – NORMAS E PADRÕES

Para motores elétricos e isolamentos existem normas, padrões e recomendações de tipo geral, além de outras específicas a ensaios aplicáveis a estes ou para determinada aplicação ou indústria [31]. A seguir, são listadas algumas das normas e recomendações, tanto nacionais como internacionais, consideradas para o desenvolvimento deste trabalho ou que atingem ao seu propósito.

Quanto a motores em geral, MIM e ensaios aplicáveis:

- ABNT NBR 17094-2:2008 “Máquinas elétricas girantes - Motores de indução” (baseada nas IEC 60034-1:2004, IEC 60034-12:2007 e NEMA MG1:2004)
- ABNT NBR 5383-2:2007 “Máquinas elétricas girantes – Parte 2: Motores de indução monofásicos - Ensaio” (baseada nas IEEE Std 114:2001, IEEE Std 43:2000, CSA C747:1994 e NOM 014:1997)
- IEEE Std 114™-2010 “*IEEE Std 114-2010 Standard Test Procedure for Single-Phase Induction Motors*”
- IEEE Std 112™-2004 “*IEEE Std 112-2004 Standard Test Procedure for Polyphase Induction Motors and Generators*”
- IEC 60034-1:2004 “*Rotating electrical machines – Part 1: Rating and performance*”
- IEC 60050-411:1996 “*International Electrotechnical Vocabulary – Chapter 411: Rotating machines*”
- IEEE Std 839-1986 “*IEEE Guide: Procedures for Testing Single-Phase and Polyphase Induction Motors for Use in Hermetic Compressors*”
- IEEE Std 43-2000 “*Recommended practice for testing insulation resistance of rotating machinery*”
- IEEE Std 1415-2006 “*Guide for Induction Machinery Maintenance Testing and Failure Analysis*”
- ANSI C50.32-1976 - IEEE Std 117-1974 “*IEEE Standard Test Procedure for Evaluation of Systems of Insulating Materials for Random-Wound AC Electric Machinery*”
- IEEE Std 522-2004 “*Guide for Testing Turn Insulation Form-Wound Stator Coils*”
- ANSI/NEMA MG1-2011 : Section II : Part 18 “*Small (fractional) and medium (integral) machines : Motors for hermetic refrigeration compressors*”

Quanto a isolamento e descargas parciais:

- IEC 60270:2000/BS EN 60270:2001 “*High-Voltage Test Techniques - Partial Discharge Measurements*”
- IEC 61934:2006 “*Electrical insulating materials and systems - Electrical measurement of PD under short rise time and repetitive voltage impulses*”
- IEC 60664-4:2007 “*Insulation coordination for equipment within low-voltage systems – Part 4: Consideration of high-frequency voltage stress*”
- IEC 60034-27:2007 “*Rotating electrical machines – Off-line partial discharge measurements on the stator winding insulation of rotating electrical machines*”
- IEEE Std 95-2002 “*Recommended practice for insulation testing of AC electric machinery with High Direct Voltage*”
- IEEE Std 436™-1991 (R2007) “*IEEE Guide for Making Corona (Partial Discharge) Measurements on Electronics Transformers*”
- IEEE 1434-2000 “*IEEE Trial-Use Guide to the Measurement of Partial Discharges in Rotating Machinery*”
- IEEE 400-2001 “*IEEE Guide for Field Testing and Evaluation of the Insulation of Shielded Power Cable Systems*”
- IEEE PC37.301™/D5:2008 “*IEEE PC37.301™/D5 Draft Standard High Voltage Switchgear (above 1000 V) Tests Techniques – Partial Discharge measurements*” que adota a norma IEC 60270.
- UL 1446 “*Standard of Safety for Systems of Insulating Materials – General*”
- ABNT NBR IEC 60085:2012 “*Isolação elétrica - Avaliação térmica e designação*”
- ABNT NBR 6940:1981 “*Técnicas de ensaios elétricos de alta tensão – Medição de descargas parciais*”
- ABNT NBR 7294:2010 “*Fios e cabos elétricos – Ensaio de descargas parciais*”
- ABNT NM 60317:2007-2009 “*Especificações para tipos particulares de fios para enrolamentos*”
- ANSI/NEMA MW 1000-2012 “*Magnetic wire*”.